

Wrocław, 24.04.2019 r.

dr inż. Marek Paweł Ciurys  
Politechnika Wrocławska  
Wydział Elektryczny  
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych  
ul. Smoluchowskiego 19  
50-372 Wrocław

Załącznik nr 3  
do wniosku z dnia 24 kwietnia 2019  
o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego

**AUTOREFERAT PRZEDSTAWIAJĄCY OPIS DOROBKU  
I OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH**

## AUTOREFERAT

### 1. Imię i nazwisko

Marek Paweł Ciurys

### 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

- a) Dyplom magistra inżyniera elektryka, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny, kierunek Elektrotechnika, specjalność Maszyny i Napędy Elektryczne, 2004 r.
- b) Stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie naukowej Elektrotechnika. Stopień został nadany uchwałą Rady Naukowej Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wroclawskiej w dniu 19.10.2009 r. na podstawie rozprawy pt. "Analiza pracy bezszczotkowego silnika prądu stałego przy zmiennym obciążeniu na przykładzie rozrusznika samochodowego", Politechnika Wroclawska, 2009. Promotorem rozprawy był prof. dr hab. inż. Ignacy Dudzikowski.

Rozprawa doktorska została zgłoszona przez Wydział Elektryczny Politechniki Wroclawskiej do nagrody Prezesa Rady Ministrów przy poparciu Senatu Politechniki Wroclawskiej i Komitetu Elektrotechniki PAN. Została zgłoszona również do Nagrody Naukowej IV Wydziału Nauk Technicznych PAN.

### 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- Od 01.10.2009 do 31.01.2010 zatrudniony na stanowisku starszego technika w Instytucie Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wroclawskiej.
- Od 01.02.2010 do 31.01.2011 zatrudniony na stanowisku asystenta naukowo-dydaktycznego w Instytucie Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wroclawskiej.
- Od 01.02.2011 zatrudniony na stanowisku adiunkta naukowo-dydaktycznego w Instytucie Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wroclawskiej. W dniu 01.10.2014 Instytut został przekształcony w Katedrę Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych.

**4. Wskazanie osiągnięcia naukowego wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789):**

**a) Tytuł osiągnięcia naukowego**

Podstawą wniosku habilitacyjnego stanowi cykl publikacji powiązanych tematycznie pod wspólną nazwą: „*Analiza zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych w bezszczotkowych i komutatorowych silnikach wzbudzanych magnesami trwałymi*”. Cykl zawiera łącznie 11 publikacji.

**b) Publikacje lub inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego:**

- [1] Ignacy Dudzikowski, Marek P. Ciurys, *Komutatorowe i bezszczotkowe maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Monografia naukowa. Seria Wydawnicza „Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki” Komitetu Elektrotechniki Polskiej Akademii Nauk; t. 20. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011. 262 s. Udział 40%.
- [2] Marek P. Ciurys, *Electromagnetic phenomena analysis in brushless DC motor with speed control using PWM method*. Open Physics, 2017, vol. 15, nr 1, s. 907-912. Czasopismo z listy filadelfijskiej. Punkty MNiSW 15 (2013-2016); IF(2017) =0,755; Artykuł indeksowany w bazach Web of Science, SCOPUS. Udział 100 %.
- [3] Marek P. Ciurys, *Analysis of the influence of inverter PWM speed control methods on the operation of a BLDC motor*. Archives of Electrical Engineering, 2018, vol. 67, nr 4, s. 939-953. Czasopismo z listy filadelfijskiej. Punkty MNiSW 15 (2013-2016); Artykuł indeksowany w bazach Web of Science, SCOPUS. Udział 100 %.
- [4] Marek P. Ciurys, Ignacy Dudzikowski, *Analysis of a brushless DC motor integrated with a high-pressure vane pump*. Technical Transaction. Electrical Engineering. 2015, nr 1 E, s. 407-416. Punkty MNiSW 13 (2013-2016). Udział 60%.
- [5] Marek P. Ciurys, Ignacy Dudzikowski, Grzegorz Bogusz, *An analysis of a brushless DC motor with a cup-rotor*. Lecture Notes in Electrical Engineering, ISSN 1876-1100; vol. 324, Analysis and simulation of electrical and computer systems: Springer, cop. 2015. s. 365-375. Publikacja indeksowana w bazach WoS, SCOPUS; Punkty MNiSW 15. Udział 70 %.
- [6] Marek P. Ciurys, Ignacy Dudzikowski, *Stany dynamiczne w rozruszniku samochodowym z magnesami neodymowymi*. Przegląd Elektrotechniczny. 2013, R. 89, nr 9, s. 10-14. Punkty MNiSW 10 (2013); Artykuł indeksowany w bazie SCOPUS. Udział 75 %.
- [7] Wiesław Fiebig, Ignacy Dudzikowski, Marek Ciurys, Hubert Kuczwa, *A vane pump integrated with an electric motor*. The 9th International Fluid Power Conference, 9. IFK, March 24-26, 2014, Aachen, Germany. Udział 25%.

- [8] Marek P. Ciurys, *Time-stepping finite element analysis of a brushless DC motor with the PWM speed control*. Publikacja indeksowana w bazach WoS i SCOPUS, 2017 International Symposium on Electrical Machines SME 2017, s. 1-6. Punkty MNiSW 15. Udział 100 %.
- [9] Marek P. Ciurys, Ignacy Dudzikowski, Marcin Pawlak, *Laboratory tests of a PM-BLDC motor drive*. Selected Problems of Electrical Engineering and Electronics (WZEE) 2015, s. 1-6. Publikacja indeksowana w bazach WoS, SCOPUS; Punkty MNiSW 15. Udział 65 %.
- [10] Marek P. Ciurys, Ignacy Dudzikowski, *Analiza dynamicznych i stacjonarnych stanów pracy rozrusznika samochodowego wzbudzanego magnesami trwałymi*. Maszyny Elektryczne, Zeszyty Problemowe. 2013, nr 100, s. 141-146. Punkty MNiSW 5 (2013). Udział 70 %.
- [11] Marek P. Ciurys, Ignacy Dudzikowski, *Analiza bezszczotkowego silnika prądu stałego z magnesami NdFeB*. XLVII International Symposium on Electrical Machines (SME 2011) Szczecin, Poland, Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe. 2011, nr 93, s. 143-147, Punktacja MNiSW 6 (2010-2012). Udział 70 %.

W tabeli 1 zebrane zostały informacje dotyczące pozycji wskazanych w jednolitym cyklu publikacji.

Tab. 1. Analiza wskazanych pozycji jednolitego cyklu publikacji

Nr	Wkład wnioskodawcy	Punktacja wg ministerialnego wykazu czasopism	Rok publikacji
1	40 %	Monografia	2011
2	100 %	15	2017
3	100 %	15	2018
4	60 %	13	2015
5	70 %	15	2015
6	75 %	10	2013
7	25 %	Nie dotyczy	2014
8	100 %	15	2017
9	65 %	15	2015
10	70 %	5	2013
11	70 %	6	2011

**c) Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania**

**WSTĘP**

Przedstawiony zbiór publikacji naukowych powiązanych tematycznie obejmuje wyniki wieloletnich badań autora wniosku z zakresu analizy zjawisk elektromagnetycznych, elektromechanicznych oraz przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w bezszczotkowych [1 – 5, 7 – 9, 11] i komutatorowych silnikach wzbudzanych magnesami trwałymi [1, 6, 10] oraz w układach napędowych z tymi silnikami.

**Silniki wzbudane magnesami trwałymi** charakteryzują się wysoką sprawnością, prostą konstrukcją i technologią wytwarzania a także dużą wartością momentu i mocy przypadającą na jednostkę masy i objętości. Dzięki swoim zaletom znajdują zastosowanie m.in. w napędach urządzeń komputerowych, sprzęcie powszechnego użytku, napędach pojazdów, w lotnictwie oraz w automatyce przemysłowej. Stosowane są również w medycynie, urządzeniach kosmicznych oraz do specjalnych aplikacji. Ciągły postęp w produkcji magnesów trwałych oraz rozwój i systematyczne obniżanie się kosztów produkcji energoelektronicznych układów zasilających stymuluje rozwój silników wzbudzanych magnesami trwałymi i przyczynia się do rozszerzania ich aplikacji. Dlatego analiza zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych w tych silnikach jest istotna nie tylko pod względem poznawczym ale również praktycznym.

Silniki wzbudane magnesami trwałymi najczęściej pracują przy zasilaniu z autonomicznych źródeł energii (akumulatorów) lub są zasilane przez przekształtniki energoelektroniczne a charakter ich momentu obciążenia oraz momentu bezwładności układu napędowego wynika z napędzanych maszyn roboczych i specyfiki ich działania. Praca silników zależy również od zastosowanej metody ich sterowania. Z tych względów analiza zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych oraz przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w bezszczotkowych i komutatorowych silnikach wzbudzanych magnesami trwałymi oraz w układach napędowych z tymi maszynami powinna uwzględniać wzajemne interakcje pomiędzy układem zasilającym – sterującym, silnikiem i maszyną roboczą z uwzględnieniem zjawisk fizycznych w całym układzie napędowym. Z powodu złożoności takich układów w dostępnej literaturze brakuje metod analitycznych do wyznaczania przebiegów czasowych oraz parametrów ruchowych z uwzględnieniem zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych w tego rodzaju napędach.

*Z tego względu autor wniosku postawił sobie za cel naukowy opracowanie numerycznych modeli obliczeniowych i za ich pomocą zbadanie i analizę zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych oraz przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w silnikach bezszczotkowych prądu stałego a także w silnikach komutatorowych wzbudzanych magnesami trwałymi i w układach napędowych z tymi silnikami [1 – 11].*

Badania zostały wykonane dla pracy silników zarówno przy stałym jak i przy zmiennym momencie obciążenia oraz momencie bezwładności układów napędowych, z uwzględnieniem wpływu temperatury oraz warunków ich zasilania. Analizowane było bezpośrednie zasilanie z autonomicznych źródeł energii (akumulatorów) [1, 6, 10], zasilanie ze źródeł napięcia stałego przez falownik [1, 4, 5, 11] oraz zasilanie z sieci jednofazowej przez prostownik i falownik [2, 3, 8, 9].

#### **ANALIZA I BADANIE ZJAWISK ELEKTROMAGNETYCZNYCH I ELEKTROMECHANICZNYCH W SILNIKACH BEZSZCZOTKOWYCH PRĄDU STAŁEGO**

Publikacje [1 – 5 oraz 7 – 9 i 11] dotyczą analizy zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych oraz przebiegów czasowych w silnikach bezszczotkowych prądu stałego oraz w układach napędowych z tymi silnikami. Do potrzeb analizy ich pracy i zjawisk fizycznych w nich występujących **autor wniosku opracował dwuwymiarowe polowe i polowo-obwodowe numeryczne modele obliczeniowe silników bezszczotkowych oraz układów: źródło zasilania – przekształtnik – silnik bezszczotkowy** [1 – 5, 8, 11].

W części polowej opracowanych modeli autor uwzględnił m.in.:

- wymiary geometryczne obwodów magnetycznych analizowanych maszyn,
- kierunek magnesowania magnesów,
- charakterystyki magnesowania i konduktywność blach stojana oraz jarzma wirnika,
- charakterystyki odmagnesowania i konduktywność magnesów,
- straty mocy w uzwojeniu, straty mocy od prądów wirowych w wirniku oraz straty mocy od prądów wirowych i histerezy w stojanie silnika.

W części obwodowej opracowanych modeli został przez autora uwzględniony m.in.:

- sposób zasilania uzwojeń silnika przez falownik oraz sposób sterowania tranzystorami przekształtnika przy regulacji prędkości obrotowej metodą PWM (bipolarny oraz unipolarny),
- rzeczywisty przebieg czasowy napięcia źródłowego i parametry sieci zasilającej,
- parametry przekształtnika (prostownika, filtra wygładzającego napięcie oraz falownika),

- rezystancje i indukcyjności połączeń czołowych uzwojenia,
- ograniczenie wartości chwilowych prądów pasmowych silnika do poziomu nie powodującego odmagnesowania magnesów.

Zjawiska cieplne uwzględniono w sposób uproszczony. Parametry magnesów trwałych oraz konduktywności materiałów przewodzących przyjęto dla zakładanych wartości temperatur tych elementów. Temperatury te następnie zostały zweryfikowane za pomocą pomiarów cieplnych wykonywanych za pomocą kamery termowizyjnej oraz za pomocą czujników temperatury umieszczonych w badanych maszynach.

**Opracowane przez habilitanta numeryczne modele obliczeniowe oraz wykonane badania eksperymentalne umożliwiły autorowi wykonanie analizy zjawisk fizycznych, przebiegów czasowych oraz parametrów silników bezszczotkowych prądu stałego oraz układów z tymi silnikami z uwzględnieniem wpływu różnych metod regulacji prędkości obrotowej oraz wzajemnych powiązań obwodu magnetycznego i elektrycznego silnika wraz z przekształtnikiem zasilającym [1 – 5, 7 – 9, 11].**

Autor analizował trzy metody regulacji prędkości: modulację PWM falownika [2, 3, 7 – 9] bipolarną (H\_PWM\_L\_PWM) i unipolarną (H\_ON\_L\_PWM oraz H\_ON\_L\_PWM) oraz regulację przez zmianę wartości napięcia zasilającego falownik [9].

Praca PWM falownika o częstotliwości od kilkunastu do kilkudziesięciu tysięcy herców powoduje pulsacje przebiegów prądów pasmowych. Z powodu pulsacji indukcji magnetycznej spowodowanej żłobkowaniem stojana, pulsacjami prądów pasmowych silnika wynikającymi z komutacji oraz pracy PWM falownika, w magnesach trwałych i w rdzeniu wirnika powstają straty mocy. Zmiany wartości prądów powodują zmianę rozkładu przestrzennego i pulsacje indukcji magnetycznej również w stojanie. Wpływa to na zmianę strat mocy w silniku oraz zmianę indukcyjności uzwojenia, co przenosi się na wartości chwilowe wielkości elektrycznych w układzie napędowym. Przebiegi czasowe, parametry ruchowe oraz zjawiska elektromagnetyczne w układzie napędowym z silnikiem BLDC zależą również od zastosowanej metody modulacji PWM falownika.

W dostępnej literaturze zagadnienia dotyczące wpływu metod regulacji prędkości obrotowej na zjawiska fizyczne, przebiegi czasowe oraz parametry ruchowe nie zostały dostatecznie zbadane. Spotykane w literaturze opracowania dotyczą przeważnie tylko wybranych wielkości fizycznych np. pulsacji momentu bądź przebiegów prądów pasmowych. Ponadto analizy takie wykonywane są najczęściej za pomocą modeli obwodowych nieuwzględniających m.in. nasycenia w obwodzie magnetycznym, pulsacji strumienia magnetycznego oraz zmian indukcyjności uzwojenia. Jedynie za pomocą polowo-obwodowego modelowania metodą

elementów skończonych można dokładnie uwzględnić wzajemne powiązanie zjawisk zachodzących w obwodzie magnetycznym i elektrycznym silnika wraz z przekształtnikiem zasilającym.

**Dlatego na szczególną uwagę zasługuje uwzględnienie w opracowanych modelach polowo-obwodowych pracy PWM falownika [2, 3, 8] oraz wykonana analiza obliczeniowa i badania eksperymentalne wpływu tej pracy na zjawiska fizyczne, przebiegi czasowe oraz parametry silników BLDC oraz układów napędowych z tymi maszynami [2, 3, 8, 9].**

Za pomocą opracowanych modeli polowo-obwodowych autor wniosku wykonał analizę pola magnetycznego w analizowanych silnikach oraz wyznaczył przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych w całym układzie: sieć zasilająca – prostownik – falownik – silnik BLDC [2, 3, 8]. **Wyznaczone przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych uwzględniają ich wzajemną interakcję i umożliwiają dokładne wyznaczenie parametrów układu napędowego.**

Autor wniosku przeanalizował zjawiska fizyczne w układzie napędowym oraz przebiegi czasowe m.in.: napięcia i prądu pobieranego z sieci, prądów i napięć w obwodach przekształtnika i silnika, strumieni magnetycznych sprzężonych z pasmami uzwojenia, momentu i prędkości silnika, strat mocy w żelazie stojana, straty mocy w magnesach i elementach litych wirnika oraz strat mocy w uzwojeniu [2, 3, 8]. Wyjaśnił również genezę zjawiska przepływu prądu w trzech pasmach silnika (zasilane są 2 pasma) w przedziałach czasu pomiędzy komutacjami oraz wpływ tego zjawiska m.in. na: pulsacje przebiegów w układzie napędowym oraz na asymetrię napięć pasmowych [2].

Habilitant wykonał analizę porównawczą wpływu metody modulacji PWM falownika [3] m.in. na: przebiegi czasowe prądu pobieranego przez przekształtnik, prądów pasmowych silnika i ich pulsacje, przebieg i pulsacje momentu mechanicznego, pulsacje prędkości obrotowej, straty mocy w wirniku, straty mocy w żelazie stojana, straty mocy w przekształtniku oraz na sprawność przekształtnika, silnika BLDC oraz całego układu napędowego.

Na podstawie otrzymanych wyników badań symulacyjnych habilitant wykazał, że praca PWM falownika ma istotny wpływ na przebiegi czasowe oraz parametry układu napędowego a spowodowane nią pulsacje strumienia magnetycznego są główną przyczyną zwiększenia strat mocy w wirniku oraz w żelazie stojana [2, 3]. Przy tej samej wartości prędkości obrotowej i momentu obciążenia silnika, przy metodzie bipolarnej, straty mocy w żelazie stojana mogą być nawet o około 60% większe niż przy metodzie unipolarnej [3]. Przy metodzie bipolarnej znacznie większe są również straty mocy w wirniku. W wyniku większych strat mocy w silniku



jego sprawność przy metodzie bipolarnej jest znacznie mniejsza niż przy metodzie unipolarnej [3].

Wyniki analizy obliczeniowej zostały zweryfikowane pomiarowo na zaprojektowanym i zbudowanym stanowisku badawczym dla unipolarnej oraz bipolarnej metody modulacji PWM falownika [3]. Korzystając ze zmierzonych przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych autor wniosku wyznaczył zależność parametrów ruchowych układu napędowego od prędkości obrotowej dla bipolarnej i unipolarnej pracy PWM falownika [3].

Badania eksperymentalne wykazały, że przy metodzie bipolarnej wartości maksymalne prądów pasmowych są od 3 do 17 % większe niż przy metodzie unipolarnej. Większe od 46,3 do 481 % są również pulsacje tych prądów pochodzące od pracy PWM falownika. Jest to przyczyną znacznie większych (od 31 do 448 %) strat mocy zarówno w silniku jak i w przekształtniku (od 36 – 74 %) przy metodzie bipolarnej. W wyniku większych strat mocy w układzie napędowym, większa jest o 7– 47 % wartość średnia prądu pobieranego przez przekształtnik. Większa jest również, o ok. 9-14%, wartość maksymalna prądu pobieranego przez przekształtnik a sprawność układu napędowego jest mniejsza o 4- 24% [3].

***Weryfikacja eksperymentalna wykazała poprawność opracowanych modeli polowo-obwodowych oraz ich przydatność do analizy zjawisk fizycznych i przebiegów czasowych w układach napędowych z silnikami bezszczotkowymi oraz do wyznaczania ich parametrów ruchowych.***

W celu wyznaczenia wpływu stosowania modulacji PWM falownika na zjawiska fizyczne oraz przebiegi czasowe i parametry układu: jednofazowa sieć zasilająca – prostownik – falownik – silnik BLDC, wykonano badania eksperymentalne przy regulacji prędkości obrotowej silnika przez modulację PWM falownika oraz przez zmianę wartości napięcia zasilającego falownik [9]. Zbadano przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie oraz zależność parametrów silnika i układu napędowego od prędkości obrotowej [9]. Badania eksperymentalne wykazały, że straty mocy w układzie napędowym z regulacją wartości napięcia na wejściu przekształtnika są (w zależności od prędkości obrotowej) od 1,57 do 2,72 razy mniejsze niż straty mocy w układzie z modulacją PWM falownika. W układzie bez modulacji PWM sprawność silnika jest większa o 6 - 51 %, sprawność przekształtnika o 1,6 - 2,7 % a sprawność całego układu o 7,7 – 55,1 %.

***Analiza uzyskanych wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych wykazała jak duży wpływ mają metody regulacji prędkości obrotowej na zjawiska fizyczne, przebiegi czasowe, straty mocy oraz parametry silników bezszczotkowych prądu stałego i układów napędowych z tymi silnikami [3, 9].***

W ramach prowadzonych badań [1 (rozdział 12.2), 11] autor wniosku zajmował się również wyznaczeniem wpływu temperatury oraz momentu obciążenia silnika na: rozkład pola magnetycznego, wartość strumienia magnetycznego i jego pulsacje, moment zaczepowy, odporność magnesów na odmagnesowanie, pulsacje momentu elektromagnetycznego oraz na przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie: źródło zasilania – przekształtnik – silnik bezszczotkowy.

Prace badawcze przedstawione w publikacjach [2 – 5, 8, 9] zostały wykonane na przykładzie silnika bezszczotkowego przeznaczonego do napędu pompy łopatkowej odwróconego działania. Silnik ten został opracowany podczas realizacji grantu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, Programu Badań Stosowanych pt. *„Opracowanie innowacyjnych rozwiązań wysokociśnieniowych pomp łopatkowych ze zintegrowanym mechatronicznym napędem elektrycznym”*. Grant był realizowany w konsorcjum Politechniki Wrocławskiej z Zakładami Elektrotechniki Motoryzacyjnej Sp. z o. o. w Dusznikach Zdroju. Szczegółowe wyniki badań wykonanych w tym grantcie autor wniosku zamieścił w czterech niejawnych raportach serii SPR.

We wszystkich dotychczas stosowanych rozwiązaniach układów napędowych z pompami łopatkowymi pompa oraz silnik stanowiły dwa odrębne elementy. Podczas realizacji grantu autor wniosku wraz z prof. dr hab. inż. Ignacym Dudzikowskim ***opracował nowe rozwiązanie konstrukcyjne silnika elektrycznego [2 – 5, 7 – 9], w którego wirnik można wbudować wysokociśnieniową pompę łopatkową odwróconego działania.*** Stojan opracowanego silnika elektrycznego jest nieruchomym elementem kadłuba całego urządzenia. Obudowa zewnętrzna pompy wiruje wraz z wirnikiem silnika elektrycznego. Część wewnętrzna pompy (z łopatkami) jest nieruchoma. Wydajność pompy w takim rozwiązaniu jest regulowana przez zmianę prędkości obrotowej silnika, metodą PWM, przez zasilający go przekształtnik. Umożliwia to m.in. uproszczenie układów sterowania hydraulicznego i obniżenie kosztu ich wykonania.

***Ze względu na podjęcie nowego tematu, który nie był dotąd analizowany w literaturze krajowej ani światowej konieczne było wykonanie przez autora kompleksowej analizy zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych w opracowanym silniku i układzie napędowym.***

Autor wniosku, w celu przeanalizowania zjawiska wnikania strumienia magnetycznego do wnętrza pompy łopatkowej wbudowanej w wirnik silnika i wyznaczenia kształtu i wymiarów obwodu magnetycznego silnika [4, 5], wykorzystując metodę elementów skończonych (MES), opracował dwuwymiarowe modele połowe i połowo-obwodowe uwzględniając współpracę silnika z przekształtnikiem energoelektronicznym. **W celu ograniczenia wnikania strumienia**

magnetycznego do wnętrza pompy między jej obudową zewnętrzną a jarzmem wirnika silnika zastosowana została tuleja niemagnetyczna [4]. Wykonana polowa i polowo-obwodowa analiza obliczeniowa pozwoliła wyznaczyć wpływ wymiarów obwodu magnetycznego na zjawisko wnikania strumienia magnetycznego do wnętrza pompy oraz pozwoliła dobrać docelowe rozwiązanie obwodu magnetycznego, które zabezpiecza pompę przed tym zjawiskiem.

*Autor wniosku współuczestniczył w opracowaniu modelu matematycznego oraz obwodowego modelu obliczeniowego układu: źródło zasilania – przekształtnik – silnik bezszczotkowy z wbudowaną pompą łopatkową [7]. W modelu uwzględniono zjawiska fizyczne zachodzące zarówno w układzie elektrycznym jak i hydraulicznym oraz m.in. pracę PWM falownika i stabilizację prędkości obrotowej silnika hydraulicznego obciążającego pompę łopatkową wbudowaną w wirnik silnika elektrycznego.* Numeryczny model obliczeniowy układu został opracowany w programie AMESim (z uwzględnieniem skryptów opracowanych w programie Matlab – Simulink) [7].

Za pomocą opracowanego modelu obliczono m.in. przebiegi: ciśnienia w przestrzeniach między łopatkowych pompy, momentu działającego na wirnik silnika elektrycznego (z uwzględnieniem sił działających na elementy pompy łopatkowej) oraz prędkości obrotowej silnika elektrycznego (pompy) i silnika hydraulicznego [7]. Zbadano reakcję układu napędowego na zmianę momentu mechanicznego silnika hydraulicznego. **Przeprowadzone obliczenia wykazały, że opracowany układ napędowy stabilizuje prędkość silnika hydraulicznego na zadanym poziomie [7].** Obliczenia przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie: jednofazowa sieć zasilająca – prostownik – falownik – zaprojektowany silnik BLDC w dynamicznych i stacjonarnych stanach pracy, przy obciążeniu silnika momentem wynikającym z pracy łopatkowej odwróconego działania, autor wniosku wykonał również wykorzystując metodą polowo-obwodową [8]. Wyniki badań wykazały **bardzo dobre właściwości dynamiczne opracowanego układu napędowego pompy oraz przydatność opracowanych modeli do analizy zjawisk fizycznych i przebiegów czasowych w układzie: źródło zasilania – przekształtnik – silnik BLDC z wbudowaną pompą łopatkową [7, 8].**



## ANALIZA I BADANIE ZJAWISK ELEKTROMAGNETYCZNYCH I ELEKTROMECHANICZNYCH W SILNIKACH KOMUTATOROWYCH WZBUDZANYCH MAGNESAMI TRWAŁYMI

Prace dotyczące analizy i badania zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych w silnikach komutatorowych wzbudzanych magnesami trwałymi autor wniosku rozpoczął podczas realizacji *projektu badawczego „Fractional horse power permanent magnet commutator machines” zleconego przez Centrum Badawcze firmy Bosch w Stuttgarcie*. Prace te były prowadzone równoległe do prac badawczych wykonywanych przy opracowywaniu rozprawy doktorskiej. Umiejętności i wiedzę nabyte podczas realizacji projektu badawczego realizowanego dla Centrum Badawczego firmy Bosch autor wniosku rozwijał w następnych latach. Badania te dotyczyły analizy metodami polowymi, polowo-obwodowymi oraz obwodowo-polowymi zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych oraz przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w silnikach komutatorowych wzbudzanych magnesami trwałymi i układach napędowych z tymi silnikami, zarówno przy stałym jak i zmiennym momencie obciążenia oraz momencie bezwładności na przykładzie rozruszników samochodowych [1, 6, 10].

W rozrusznikach pojazdów samochodowych stosowane były silniki szeregowo lub szeregowo – bocznikowe. Postęp w technologii wytwarzania magnesów trwałych doprowadził do rozwoju rozruszników z silnikami komutatorowymi o magnesach trwałych. Są one zwykle wyposażone w przekładnię planetarną zwiększającą moment i zmniejszającą prędkość obrotową zębniaka. Zastosowanie magnesów trwałych spowodowało zmniejszenie wymiarów i masy oraz zwiększenie sprawności rozruszników, dlatego są one powszechnie stosowane w samochodach osobowych.

Rozruszniki samochodowe są specyficznymi maszynami elektrycznymi. Pracują w szerokim zakresie temperatury otoczenia (od -40 do 150°C). Szczególnie niekorzystna jest praca w ujemnych temperaturach, ponieważ moment obciążenia rozrusznika wzrasta utrudniając rozruch silnika spalinowego. Główną przyczyną jest wzrost momentu tarcia silnika spalinowego wynikający ze wzrostu lepkości oleju. Dodatkowym utrudnieniem, w stosunku do temperatur dodatnich, jest zmiana parametrów akumulatora. Zmniejszeniu ulega wartość siły elektromotorycznej akumulatora, zwiększa się natomiast jego rezystancja wewnętrzna. Wolniej zachodzące reakcje chemiczne w elektrolicie w niskich temperaturach powodują zmniejszenie pojemności akumulatora. Czas rozruchu silnika spalinowego, czyli czas pracy rozrusznika, w zależności od temperatury otoczenia, pojemności skokowej i rodzaju silnika spalinowego oraz pojemności i stopnia naładowania akumulatora wynosi od około jednej sekundy do

Ciary

kilkudziesięciu sekund. Prądy robocze rozruszników kształtują się na poziomie setek amperów przy napięciu na silniku rzędu kilku woltów.

Moment obciążenia rozrusznika generowany przez silnik spalinowy zmienia się w szerokim zakresie. Przyczyną tego są zmiany momentu tarcia w silniku spalinowym zależne od temperatury i prędkości obrotowej oraz zmiany momentu kompresji i dekompresji gazów w cylindrach zależne od kąta obrotu wału korbowego. Zmienny jest również momentu bezwładności układu napędowego. Przyczyną jego zmian jest ruch posuwisto-zwrotny korbowodów oraz tłoków silnika spalinowego.

Napięcie na silniku rozrusznika zmienia się w trakcie pracy co wynika ze zmian momentu i prądu obciążenia oraz zmiany parametrów akumulatora. Napięcie na zaciskach akumulatora zależy od jego pojemności, stopnia naładowania oraz od wartości chwilowej prądu. Rozrusznik samochodowy powinien nadać wałowi korbowemu silnika spalinowego prędkość, przy której zaczyna się regularny proces zapłonu.

Rozruch silników spalinowych jest złożonym procesem elektromechanicznym, podczas którego zmieniają się wielkości elektryczne i mechaniczne w układzie: akumulator – silnik elektryczny rozrusznika – przekładnia mechaniczna – silnik spalinowy. W analizie obliczeniowej procesu rozruchu należy więc uwzględniać cały układ elektromechaniczny czyli: układ elektryczny, obwód magnetyczny silnika oraz układ mechaniczny.

**Dostępne komercyjne programy renomowanych firm wykorzystujące metody polowo – obwodowe nie umożliwiały obliczania układów elektromechanicznych pracujących przy zmiennym momencie obciążenia i zmiennym momencie bezwładności wynikających ze specyfiki rozruszników samochodowych. Brakowało również algorytmów do obliczania takich układów.**

*Dlatego w celu wyznaczenia parametrów ruchowych i przeprowadzenia analizy zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych w dynamicznych i stacjonarnych stanach pracy rozruszników samochodowych z komutatorowymi silnikami wzbudzonymi magnesami trwałymi (ferrytowymi oraz neodymowymi) autor wniosku opracował własne algorytmy i programy obliczeniowe.*

Prace dotyczące silników komutatorowych wzbudzanych magnesami ferrytowymi autor rozpoczął podczas realizacji projektu badawczego zleconego przez **Centrum Badawcze firmy Bosch w Stuttgarcie**, już w trakcie realizacji doktoratu. W okresie tym *autor opracował model matematyczny, algorytm i program obliczeń przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie: akumulator – silnik komutatorowy wzbudzany magnesami ferrytowymi – przekładnie mechaniczne – silnik spalinowy. Opracował również procedurę*

*wyznaczania przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w analizowanym układzie* z uwzględnieniem wyników obliczeń polowych i polowo-obwodowych, wykonał również wstępne obliczenia za pomocą opracowanego w środowisku Matlab własnego oprogramowania. Wyniki tych prac zostały zamieszczone w trzech publikacjach:

1. Ciurys Marek Paweł, Dudzikowski Ignacy, Gierak Dariusz: *Modelling of a car starter with permanent magnet commutator motor*. Compel. 2009, vol. 28, nr 3, s. 722-729, Punktacja MNiSW z 2010: 13, Lista Filadelfijska, IF - 0.460.
2. Ciurys Marek Paweł, Dudzikowski Ignacy, Gierak Dariusz : *Obwodowo-polowe modelowanie silnika komutatorowego o magnesach trwałych pracującego przy zmiennym obciążeniu*. Przegląd Elektrotechniczny. 2008, R. 84, nr 6, s. 161-164, 4 rys., Punktacja MNiSW z 2010: 9, Lista Filadelfijska.
3. Ciurys Marek Paweł, Dudzikowski Ignacy, Gierak Dariusz : *Modelling of a car starter with permanent magnet commutator motor*. W: Electromagnetic phenomena in nonlinear circuits : proceedings EPNC 2008: XX Symposium, Lille, France, July 2-4, 2008. Poznań : Polskie Towarzystwo Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej, 2008. s. 25-26.

**Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych** autor wniosku kontynuował, podczas realizacji badań statutowych, prace dotyczące rozruszników samochodowych wzbudzanych magnesami ferrytowymi z wykorzystaniem opracowanego modelu matematycznego, algorytmu i programu obliczeń. Prowadził również prace badawcze dotyczące analizy silników komutatorowych wzbudzanych magnesami neodymowymi.

**Celem naukowym tych badań było pogłębienie wiedzy oraz analiza zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych oraz przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w silnikach komutatorowych wzbudzanych magnesami ferrytowymi oraz neodymowymi w dynamicznych i stacjonarnych stanach pracy.**

Wyniki prac badawczych realizowanych z tej problematyki są przedstawione w artykułach [6, 10] oraz monografii [1].

ad. [1] Ignacy Dudzikowski, **Marek P. Ciurys**, *Komutatorowe i bezszczotkowe maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi. Monografia naukowa*. Seria Wydawnicza „Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki” Komitetu Elektrotechniki Polskiej Akademii Nauk; t. 20. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011. 262 s. Udział 40%.

We współautorskiej monografii [1] zamieszczone zostało podsumowanie wieloletnich prac teoretycznych i eksperymentalnych autora wniosku związanych z badaniem zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych w bezszczotkowych i komutatorowych silnikach wzbudzanych magnesami trwałymi. Monografia ta została wydana pod patronatem Komitetu Elektrotechniki PAN, w serii „Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki”. Książka ta była zgłoszona przez Wydział Elektryczny Politechniki Wrocławskiej do nagrody Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w 2012 r.

Autor wniosku opracował rozdziały 14, 15 i 16 oraz współpracował z prof. dr hab. inż. Ignacym Dudzikowskim przy opracowaniu rozdziałów 2, 4, 9 – 13 i 17.

*Wyniki zamieszczone w monografii dotyczą zagadnień analizowanych przez autora w rozprawie doktorskiej, prac badawczych prowadzonych równolegle podczas realizacji doktoratu oraz prac badawczych wykonanych po uzyskaniu przez autora wniosku stopnia doktora nauk technicznych.*

#### **Wyniki prac badawczych wykonanych przez autora podczas realizacji rozprawy doktorskiej**

zostały zamieszczone w rozdziałach 14, 16 oraz częściowo w rozdziale 17. W rozdziale 14 przedstawiony został opracowany model matematyczny silnika BLDC wraz z przekształtnikiem zasilającym umożliwiającym wyznaczenie przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie zarówno przy stałym jak i przy zmiennym: momencie obciążenia oraz momencie bezwładności układu. W modelu matematycznym uwzględnione zostały m.in. wszystkie stany pracy przekształtnika zasilającego, parametry jego elementów półprzewodnikowych oraz rzeczywisty przebieg czasowy siły elektromotorycznej indukowanej w silniku z uwzględnieniem jej zależności od temperatury i chwilowej wartości prądu obciążenia.

Opracowany autorski model matematyczny, algorytm i program obliczeń zostały zweryfikowane pomiarowo (rozdział 16) na zaprojektowanym i zbudowanym przez autora wniosku stanowisku laboratoryjnym. Rozdział 17 monografii dotyczy analizy silnika BLDC pracującego jako rozrusznik samochodowy. Przedstawiono w nim wyznaczone podczas realizacji doktoratu przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie: akumulator – przekształtnik – silnik BLDC – przekładnie mechaniczne – silnik spalinowy uzyskane za pomocą opracowanego modelu matematycznego, algorytmu i programu. W rozdziale 17 przedstawiono

również wyznaczone charakterystyki elektromechaniczne rozrusznika w różnych warunkach pracy oraz analizę porównawczą opracowanego rozrusznika z silnikiem BLDC oraz rozrusznika komutatorowego wzbudzanego magnesami ferrytowymi.

**Prace badawcze zamieszczone w monografii [1] prowadzone przez autora równoległe do doktoratu,**

dotyczyły m.in. analizy pracy silników komutatorowych wzbudzanych magnesami trwałymi zasilanych z przekształtnika impulsowego (rozdziały 10, 11) oraz częściowo analizy silnika komutatorowego wzbudzanych magnesami ferrytowymi pracującego jako rozrusznik samochodowy (rozdziały 12.1, 12.2).

W rozdziale 10 monografii przedstawiono model matematyczny, algorytm oraz program do obliczania przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w systemie: sieć zasilająca – przekształtnik impulsowy – silnik magnetoelektryczny oraz analizę obliczeniową wpływu parametrów przekształtnika na przebiegi czasowe w układzie oraz na charakterystyki elektromechaniczne silnika. Wyniki analizy obliczeniowej zostały zweryfikowane eksperymentalnie (rozdział 11).

W rozdziałach 12.1 i 12.2 monografii został omówiony opracowany przez autora wniosku model matematyczny, algorytm, program i procedura obliczeń umożliwiające obliczenie przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie: akumulator – rozrusznik samochodowy z silnikiem komutatorowym – silnik spalinowy. W opracowanym autorskim modelu matematycznym, algorytmie i programie uwzględnione zostały m.in.:

- zależność napięcia na akumulatorze i jego rezystancji wewnętrznej od temperatury oraz od wartości chwilowej prądu twornika i stopnia naładowania akumulatora,
- zależność strumienia magnetycznego od temperatury, kąta obrotu wirnika oraz od wartości chwilowej prądu twornika (wyznaczaną metodą polowo – obwodową),
- zależność momentu elektromagnetycznego silnika od temperatury, kąta obrotu wirnika oraz od wartości chwilowej prądu twornika,
- zależność wartości chwilowej momentu kompresji i dekompresji gazów w cylindrach silnika spalinowego od kąta obrotu oraz chwilowej prędkości obrotowej wału korbowego,
- zależność momentu tarcia w silniku spalinowym od temperatury i wartości chwilowej prędkości obrotowej wału korbowego,
- zależność momentu bezwładności układu od kąta obrotu wału korbowego,





- straty mocy w żelazie wirnika wyznaczone z uwzględnieniem wartości indukcji w obwodzie magnetycznym obliczonych metodą połowo – obwodową,
- zależność spadku napięcia na szczotkach od wartości chwilowej prądu.

W rozdziale 2 monografii przedstawione zostały parametry i właściwości współczesnych magnesów trwałych, natomiast w rozdziale 4 zagadnienia dotyczące modelowania połowego oraz połowo-obwodowego 2½D oraz 3D silników komutatorowych wzbudzanych magnesami trwałymi.

Wyniki badań eksperymentalnych oraz weryfikacja sposobu modelowania silników metodą połowo-obwodową 2½D, została zamieszczona w rozdziale 9 monografii [1].

W rozdziale 15.3 została zamieszczona wykonana przez autora wniosku analiza przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w silniku bezszczotkowym prądu stałego przy różnym kształcie siły elektromotorycznej indukowanej w pasmach uzwojenia silnika. Połową analizę wpływu wymiarów i kształtu magnesów na moment zaczepowy, strumień magnetyczny i jego pulsacje oraz na moment elektromagnetyczny w silnikach BLDC zamieszczono w rozdziale 15.1.

#### **Wyniki prac badawczych zamieszczone w monografii wykonane przez autora po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych**

zostały przedstawione w rozdziałach 12.3, 12.4, 15.2 oraz 17.2. W zakresie silników bezszczotkowych prądu stałego dotyczą one analizy wpływu temperatury oraz obciążenia silnika bezszczotkowego na: odporność magnesów na odmagnesowanie (rozdział 15.2), rozkład pola magnetycznego w silniku, wartość strumienia magnetycznego i jego pulsacje, moment zaczepowy oraz na pulsacje momentu elektromagnetycznego (rozdział 17.2).

W rozdziałach 12.3 i 12.4 *przedstawiono wyniki prac dotyczących* silników komutatorowych wzbudzanych magnesami ferrytowymi oraz *analizy zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych oraz przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie: akumulator – silnik komutatorowy wzbudzany magnesami ferrytowymi – przekładnie mechaniczne (przekładnia planetarna – zębnik – koło zamachowe silnika spalinowego) – silnik spalinowy, w dynamicznych i stacjonarnych stanach pracy układu, w różnej temperaturze otoczenia.*

W analizie procesu rozruchu silnika spalinowego uwzględniony został cały układ elektromechaniczny: czyli obwód magnetyczny silnika, układ elektryczny (akumulator

– przewody łączące – obwód elektryczny silnika komutatorowego) oraz układ mechaniczny (wirnik silnika elektrycznego – przekładnia planetarna – zębnik – koło zamachowe silnika spalinowego – wał korbowy wraz z korbowodami i tłokami silnika spalinowego). W rozdziałach 12.3 i 12.4 przeanalizowano wpływ temperatury na: proces rozruchu silnika spalinowego oraz pojemność użyteczną akumulatora, napięcie na silniku rozrusznika, moment mechaniczny silnika elektrycznego, moment tarcia silnika spalinowego, sumaryczny moment generowany przez silnik spalinowy oraz na prędkość obrotową silnika elektrycznego i wału korbowego. Analizę wykonano dla temperatury -20 °C, 20 °C i 120 °C.

Wykonane badania wykazały, że przy analizie procesu rozruchu silników spalinowych szczególnie istotne jest uwzględnienie wpływu temperatury, gdyż ma ona duży wpływ między innymi na strumień magnetyczny w silniku, rezystancję i napięcie baterii zasilającej, rezystancję uzwojenia oraz przewodów łączących akumulator z silnikiem, moment tarcia silnika spalinowego, moment obciążenia rozrusznika a w konsekwencji również na prędkość wału korbowego od której zależy skuteczność procesu rozruchu silnika spalinowego.

Publikacja [10] nawiązuje do analizy procesu rozruchu silników spalinowych oraz do analizy zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych w układzie napędowym: akumulator – rozrusznik samochodowy z silnikiem wzbudzonym magnesami ferrytowymi – silnik spalinowy w dynamicznych i stacjonarnych stanach pracy przedstawionych w pracy [1]. O ile w pracy [1] w rozdziale 12 przedstawione zostały wyniki przeprowadzonej analizy w różnej temperaturze to w publikacji [10] skoncentrowano się na analizie wpływu różnej pojemności akumulatora na zjawiska elektromagnetyczne i elektromechaniczne oraz przebiegi czasowe w dynamicznych i stacjonarnych stanach pracy układu.

Podobnie jak w monografii [1] w artykule [10] przedstawiono polowo-obwodową analizę obliczeniową wpływu temperatury i obciążenia silnika na wartość strumienia magnetycznego i jego pulsacje oraz na pulsacje momentu elektromagnetycznego silnika a wyniki analizy polowo-obwodowej zaimplementowano w opracowanym autorskim programie obliczeniowym. Za pomocą tego programu ***przeprowadzono analizę wpływu pojemności znamionowej akumulatora na proces rozruchu silnika spalinowego oraz na zjawiska elektromagnetyczne i elektromechaniczne zachodzące w analizowanym układzie napędowym z silnikiem wzbudzonym magnesami ferrytowymi, w dynamicznych i stacjonarnych stanach pracy układu.*** Przeanalizowano m.in. wpływ pojemności znamionowej akumulatora na



przebiegi czasowe prądu, napięcia, strumienia magnetycznego, momentu mechanicznego i prędkości silnika, napięcia na akumulatorze oraz momentu obciążenia rozrusznika generowanego przez silnik spalinowy. Wyznaczono również za pomocą opracowanego autorskiego oprogramowania, charakterystyki elektromechaniczne rozrusznika wzbudzanego magnesami ferrytowymi przy zasilaniu akumulatorami o różnej pojemności. Uzyskane wyniki wykazały jak duży jest wpływ pojemności znamionowej akumulatora na proces rozruchu silnika spalinowego, przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych oraz parametry elektromechaniczne całego układu.

W każdym z analizowanych przypadków pracy (przy różnej pojemności znamionowej akumulatora [10] oraz w różnej temperaturze [1] – rozdział 12) ***wał korbowy osiągnął prędkość gwarantującą skuteczny rozruch silnika spalinowego. Świadczy to o poprawności zaprojektowanego rozrusznika z magnesami ferrytowymi i jego przydatności do rozruchu silników spalinowych.***

Analizę zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych oraz przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w silnikach komutatorowych wzbudzanych magnesami trwałymi habilitant przedstawił również w pracy [6]. **Dotyczy ona badań autora dotyczących silników komutatorowych wzbudzanych magnesami neodymowymi.** Analizę przeprowadzono na przykładzie opracowanego przez autora rozrusznika z magnesami neodymowymi. W środowisku Maxwell 2D autor wniosku opracował połowo-obwodowy model numeryczny silnika [6]. W celu uzyskania możliwie dużej wartości strumienia magnetycznego w silniku zastosowane zostały magnesy dłuższe od pakietu wirnika. Aby uwzględnić w modelu 2D przyrost tego strumienia autor opracował ekwiwalentny połowy 2½D model geometryczny silnika rozrusznika oraz ekwiwalentną charakterystykę odmagnesowania magnesów. Model 2½D opracowanego rozrusznika oraz ekwiwalentna charakterystyka odmagnesowania magnesów zostały opracowane zgodnie z metodologią przedstawioną w pracy [1] w rozdziałach 4.1 i 4.2. Opracowany model 2½D umożliwił autorowi wyznaczenie przebiegów czasowych wielkości magnetycznych, elektrycznych i mechanicznych silnika elektrycznego przy różnym obciążeniu, w różnej temperaturze.

Opracowany do analizy pracy rozruszników samochodowych z magnesami ferrytowymi model matematyczny, algorytm i program zostały zaadaptowane do analizy pracy rozruszników z magnesami neodymowymi. Za ich pomocą ***autor przeprowadził analizę zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych oraz przebiegów czasowych w układzie akumulator – rozrusznik samochodowy z magnesami neodymowymi – przekładnie mechaniczne – silnik spalinowy w różnej temperaturze pracy układu [6].*** Przeanalizowano

m.in. wpływ temperatury: na strumień magnetyczny; pulsacje prądu pobieranego z akumulatora, napięcia na silniku, momentu mechanicznego i prędkości rozrusznika; moment obciążenia generowany przez silnik spalinowy, napięcie na silniku, prędkość obrotową, moc i sprawność rozrusznika.

Przeprowadzana analiza opracowanego rozrusznika z magnesami neodymowymi wykazała, że w porównaniu z rozrusznikiem z magnesami ferrytowymi (o tej samej mocy i prędkości obrotowej) znacznemu zmniejszeniu uległy wymiary rozrusznika (długość wirnika i magnesów o 49% a średnica stojana o 10%) i poprawiła się jego dynamika [6]. Wzrosła jego sprawność, natomiast zmniejszyły się wartości względne pulsacji momentu, strumienia, prądu, siły elektromotorycznej oraz prędkości.

*Wykonane badania wykazały, że opracowany rozrusznik z magnesami neodymowymi zapewnia wymaganą prędkość obrotową wału korbowego gwarantującą skuteczny rozruch silnika spalinowego [6].*

*Autor wniosku przedstawił w pracach [1, 6, 10] wyniki kompleksowych badań dotyczących analizy zjawisk elektromagnetycznych, elektromechanicznych i przebiegów czasowych w silnikach komutatorowych wzbudzanych magnesami ferrytowymi oraz neodymowymi pracującymi przy zmiennym momencie obciążenia i zmiennym momencie bezwładności na przykładzie rozrusznika samochodowego. Analiza była wykonana w dynamicznych i stacjonarnych stanach pracy rozpatrywanych układów. W dostępnej literaturze zarówno krajowej jak i światowej takich kompleksowych badań pracy rozruszników samochodowych uwzględniających wzajemną współpracę akumulatora, rozrusznika i silnika spalinowego, w różnej temperaturze i przy zasilaniu akumulatorem o różnej pojemności dotychczas nie przedstawiano.*

Pomimo tego, że obecnie dąży się do zastąpienia silników spalinowych w pojazdach samochodowych silnikami elektrycznymi opracowana metodologia analizy pracy układu źródło zasilania – rozrusznik – przekładnie mechaniczne – silnik spalinowy jest wciąż aktualna. Może być zaadoptowana również do analizy pracy układów z silnikami spalinowymi w innych zastosowaniach np. lokomotywach spalinowych.

## PODSUMOWANIE

Prowadzone przez autora prace ukierunkowane były przede wszystkim na wyznaczanie parametrów ruchowych i analizę zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych oraz przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w silnikach bezszczotkowych oraz komutatorowych wzbudzanych magnesami trwałymi oraz w układach napędowych z tymi silnikami. Badania były prowadzone z uwzględnieniem sposobu zasilania tych maszyn (z autonomicznych źródeł energii (akumulatorów) oraz przez przekształtniki energoelektroniczne), sposobu ich sterowania oraz zmian momentu obciążenia oraz zmian momentu bezwładności wynikających z pracy napędzanych maszyn roboczych. Wykonana analiza zjawisk elektromagnetycznych, elektromechanicznych i przebiegów czasowych w rozpatrywanych układach napędowych uwzględniała wzajemne interakcje pomiędzy układem zasilająco-sterującym, silnikiem i maszyną roboczą.

Badania wykazały przydatność opracowanych modeli numerycznych do wyznaczania parametrów ruchowych i analizy zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych w silnikach wzbudzanych magnesami trwałymi i układach napędowych z tymi silnikami.

### **Do najważniejszych osiągnięć autora należy zaliczyć:**

- Opracowanie polowo – obwodowych modeli obliczeniowych układu: źródło zasilania – przekształtnik – silnik bezszczotkowy oraz uwzględnienie w opracowanych modelach polowo-obwodowych pracy bipolarnej oraz unipolarnej PWM falownika.
- Kompleksową analizę zjawisk elektromagnetycznych, elektromechanicznych oraz przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w silniku bezszczotkowym prądu stałego oraz w układzie napędowym: sieć zasilająca – prostownik – falownik – silnik BLDC z uwzględnieniem wzajemnych interakcji.
- Analizę wpływu różnych metod regulacji prędkości obrotowej na zjawiska elektromagnetyczne i elektromechaniczne, przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych oraz parametry silników BLDC oraz układów napędowych z tymi maszynami.
- Opracowanie nowego rozwiązania konstrukcyjnego silnika bezszczotkowego prądu stałego. Silnika do którego wirnika wbudowana jest pompa łopatkowa odwróconego działania.
- Analizę wpływu wymiarów obwodu magnetycznego silnika na zjawisko wnikania strumienia magnetycznego do wnętrza pompy łopatkowej wbudowanej w wirnik silnika.

- Opracowanie obwodowego oraz polowo – obwodowego modelu obliczeniowego układu: jednofazowa sieć zasilająca – prostownik – falownik – silnik bezszczotkowy prądu stałego – pompa łopatkowa.
- Analizę zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych w układzie: sieć zasilająca – przekształtnik – silnik BLDC w dynamicznych i stacjonarnych stanach pracy przy obciążeniu silnika momentem wynikającym z pracy łopatkowej odwróconego działania.
- Opracowanie i zbudowanie stanowiska do pomiarów przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie: jednofazowa sieć zasilająca – prostownik – falownik – silnik BLDC – obciążenie mechaniczne umożliwiającego badania pracy układu w różnych warunkach obciążenia, zasilania i sterowania.
- Pozytywną weryfikację doświadczalną opracowanego modelu układu: jednofazowa sieć zasilająca – prostownik – falownik – silnik BLDC – obciążenie mechaniczne, która potwierdziła zgodność wyników badań symulacyjnych i wyników badań eksperymentalnych.
- Kompleksową analizę zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych oraz przebiegów czasowych w silnikach komutatorowych wzbudzanych magnesami ferrytowymi i neodymowymi pracującymi przy zmiennym obciążeniu i zmiennym momencie bezwładności. Analiza była wykonana na przykładzie rozrusznika samochodowego w układzie: akumulator – silnik elektryczny – przekładnie mechaniczne – silnik spalinowy, w dynamicznych i stacjonarnych stanach pracy, w różnej temperaturze otoczenia oraz przy różnej pojemności akumulatora.
- Opracowanie obwodu magnetycznego silnika komutatorowego rozrusznika samochodowego wzbudzanego magnesami neodymowymi oraz polowo-obwodowego modelu 2½D numerycznego tego silnika.
- Analizę porównawczą parametrów pracy rozrusznika wzbudzanego magnesami ferrytowymi oraz rozrusznika wzbudzanego magnesami neodymowymi,
- Przydatność opracowanych układów napędowych oraz silników bezszczotkowych i komutatorowych wzbudzanych magnesami trwałymi do celów aplikacyjnych.

*Grzegorz*

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Do pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych niewchodzących w skład osiągnięcia wymienionego w punkcie 4 autor wniosku zalicza wykonane badania dotyczące analizy pracy prądnic trójfazowych z magnesami trwałymi w elektrowni wiatrowej małej mocy. Efekty prowadzonych prac naukowych w tym zakresie zostały przedstawione w publikacji:

- [1] Marek Paweł Ciurys, Manswet Bańka, Ignacy Dudzikowski, *Analiza pracy prądnicy trójfazowej z magnesami trwałymi w elektrowni wiatrowej małej mocy*. Przegląd Elektrotechniczny, 2013, R. 89, nr 2b, s. 120-123. Punktacja MNiSW (2013): 10. Artykuł indeksowany w bazie SCOPUS. Szacowany udział 50 %.

W celu analizy pracy prądnicy z magnesami trwałymi w elektrowni wiatrowej małej mocy autor wniosku opracował autorski algorytm i program obliczeń elektromagnetycznych umożliwiających wyznaczenie parametrów ruchowych prądnic podczas pracy przy różnej prędkości obrotowej, w różnej temperaturze otoczenia, przy obciążeniu różną mocą. Za pomocą tego programu autor wniosku zaprojektował trójfazową prądnicę wzbudzaną magnesami trwałymi i wykonał jej obliczenia polowe. Maszyna została zaprojektowana w taki sposób aby uzyskać możliwie dużą wartość strumienia magnetycznego i aby zminimalizować moment zaczepowy. Za pomocą opracowanego autorskiego programu zostały wyznaczone parametry ruchowe prądnicy.

Podczas pracy prądnicy na lokalną sieć wydzieloną konieczna jest stabilizacja wartości oraz częstotliwości napięcia w celu spełnienia wymagań dotyczących zasilania odbiorników energii elektrycznej. Dlatego został dobrany układ stabilizacji napięcia i częstotliwości a następnie opracowany model układu: generator – układ stabilizacji napięcia – odbiory [1]. Za jego pomocą możliwa była analiza obliczeniowa pracy prądnicy w elektrowni wiatrowej małej mocy. Analizę przeprowadzono dla różnej prędkości prądnicy i przy różnej mocy obciążenia. Zastosowany układ stabilizacji napięcia i częstotliwości (wraz z filtrem) umożliwił ograniczenie współczynnika THD w przebiegu napięcia na odbiorniku do wartości 5,0 %, a w przebiegu prądu pobieranego przez odbiornik do 1,0 %. Uzyskane wartości THD spełniły wymagania dotyczące jakości energii elektrycznej nie tylko w sieciach wydzielonych dla których była przeprowadzana analiza ale również w publicznych sieciach zasilających [1].



**Do pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych niewchodzących w skład osiągnięcia wymienionego w punkcie 4b**

autor wniosku zalicza również prace związane z trójwymiarową analizą pola magnetycznego w silnikach bezszczotkowych oraz komutatorowych prądu stałego wzbudzanych magnesami trwałymi. Efekty prowadzonych w tym zakresie badań zostały przedstawione w pracach:

- [2] Marek Paweł Ciurys, Tomasz Janta, *Trójwymiarowa analiza pola magnetycznego w silniku bezszczotkowym*. Raport serii SPR nr 4/2014. Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, 2014. Szacowany udział 95 %.
- [3] Marek Paweł Ciurys, *Trójwymiarowa analiza polowa silnika komutatorowego przeznaczonego do pracy jako rozrusznik samochodowy*. Raport serii SPR nr 22/2016. Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, 2016. Udział 100 %.

W pracach tych przedstawiono opracowane trójwymiarowe modele polowe silnika bezszczotkowego [2] oraz silnika komutatorowego wzbudzanego magnesami neodymowymi [3]. Za pomocą opracowanych modeli polowych przeprowadzono analizę obliczeniową wpływu zastosowania w silnikach bezszczotkowych i komutatorowych magnesów o długości większej od długości pakietu twornika na zwiększenie wartości strumienia magnetycznego w szczelinie powietrznej oraz rozkład nasyceń w obwodach magnetycznych tych maszyn.

Przeprowadzona analiza obliczeniowa wykazała przydatność opracowanych trójwymiarowych modeli do analizy pola magnetycznego silników bezszczotkowych i komutatorowych wzbudzanych magnesami trwałymi. Wyniki przeprowadzonych są przydatne przy projektowaniu silników bezszczotkowych oraz komutatorowych wzbudzanych magnesami trwałymi.





## 6. Podsumowanie

Dorobek naukowy autora wniosku, po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych, obejmuje 27 publikacji (4 samodzielne). W tym 1 współautorska monografia pod patronatem Komitetu Elektrotechniki PAN, w serii „Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki”, 3 artykuły w czasopismach z listy Filadelfijskiej (2 samodzielne) oraz 13 prac opublikowanych w renomowanych czasopismach takich jak: Technical Transaction. Electrical Engineering; Archives of Electrical Engineering; Przegląd Elektrotechniczny; Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, Komel. Jedna publikacja została opublikowana jako rozdział w monografii: Analysis and simulation of electrical and computer systems. Lecture Notes in Electrical Engineering wydawnictwa Springer. Autor wniosku jest współautorem 2 patentów przyznanych przez Urząd Patentowy RP oraz 1 zgłoszenia patentowego. Pozostałe publikacje zostały opublikowane w materiałach renomowanych konferencji z recenzowanymi artykułami, takich jak: Symposium on Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits (EPNC); International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF); International Fluid Power Conference; Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych (SME); Wybrane Zagadnienia Elektrotechniki i Elektroniki (WZEE).

Baza Web of Science (WoS) indeksuje 8 publikacji autora. Indeks Hirscha bez autocytowań wg WoS wynosi 2 dla prac cytowanych w tej bazie, natomiast 1 dla prac indeksowanych w WoS. Prace autora (w zakładce „Cited Reference Search”) są cytowane 31 razy (bez autocytowań 12).

Według bazy SCOPUS indeks Hirscha bez autocytowań wynosi 3. Liczba cytowanych prac wynosi 6, natomiast liczba cytowań (bez autocytowań) 14. Według „Publish or Perish”: prace autora są 54 razy cytowane (bez autocytowań) a indeks  $H=5$ .

Sumaryczny współczynnik IF (Impact Factor) publikacji naukowych autora według listy Journal Citation Reports (JCR) wynosi 1,457. Natomiast Sumaryczny współczynnik IF (Impact Factor), dotyczący dorobku naukowego habilitanta (po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych) wynosi 0,997.



**Publikacje habilitanta cytowane są również w książkach:**

- Jacek F. Gieras „Permanent magnet motor technology, design and applications”, third edition, Taylor and Francis Group, LLC, 2010.
- Tadeusz Glinka „Maszyny elektryczne i transformatory”, Wydawnictwo WNT PWN, 2018.
- Tadeusz Glinka „Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi”, Wydawnictwo WNT PWN, 2018.

**Prace autora wniosku cytowane są w rozprawach doktorskich:**

- Raphaël Andreux, „Modélisation et optimisation des démarreurs à inducteur bobiné pour l’application ”stop-start” ou micro-hybride”. Autre. Université de Lorraine, 2013. Français.
- Marcin Ziółek, „Analiza pracy silnika bezszczotkowego z cylindrycznym uzwojeniem i zewnętrznym wirnikiem”. Rozprawa doktorska, Promotor: prof. dr hab. inż. Zbigniew Goryca. Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, 2013.
- Marcin Antczak, „Polowo-obwodowa analiza zjawisk elektromagnetycznych w silniku elektrycznym o biegunach wpisywanych”. Rozprawa doktorska, Promotor: prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg. Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, 2015.
- Łukasz Knypiński, „Optymalizacja silników o magnesach trwałych na podstawie polowo-obwodowego modelu zjawisk elektromagnetycznych”. Rozprawa doktorska, Promotor: prof. dr hab. inż. Lech Nowak. Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, 2016.
- Aleksander Leicht, „Analiza stanów dynamicznych i ustalonych jednofazowego samowzbudnego generatora indukcyjnego”. Rozprawa doktorska, Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Makowski, prof. PWr. Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, 2016.

**Aktywność autora wniosku w środowisku naukowym** związana jest m.in. z aktywnym uczestnictwem w międzynarodowych konferencjach naukowych i pełnionymi funkcjami w Polskim Towarzystwie Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej (PTETiS). Autor wniosku aktywnie uczestniczył w organizacji Międzynarodowego Sympozjum Maszyn Elektrycznych w 2012 roku. Jest również z wyboru, nieprzerwanie od 2011 roku, już 3 kadencję członkiem Zarządu Oddziału Wrocławskiego PTETiS, pełniąc w tym czasie funkcję Skarbnika Oddziału.



W latach 2014 – 2017 był Członkiem Komisji Młodych Pracowników Nauki Zarządu Głównego PTETiS.

Autor wniosku jest od 2016 roku Członkiem Technical Editorial Board w czasopiśmie "Power Electronics and Drives" (ISSN: 2451-0262, eISSN: 2543-4292).

Autor wniosku aktywnie uczestniczył w realizacji projektu badawczego Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, w ramach Programu Badań Stosowanych pt.: "Opracowanie innowacyjnych rozwiązań wysokociśnieniowych pomp łopatkowych ze zintegrowanym mechatronicznym napędem elektrycznym", w konsorcjum Politechniki Wrocławskiej z Zakładami Elektrotechniki Motoryzacyjnej Sp. z o. o. w Dusznikach Zdroju, pełniąc funkcję jednego z dwóch głównych wykonawców projektu w zakresie elektrotechniki. Autor wniosku jest również koordynatorem współpracy Politechniki Wrocławskiej z Zakładami Elektrotechniki Motoryzacyjnej sp. o o. o. z siedzibą w Dusznikach Zdroju. Wynikiem prowadzonych prac w projekcie jest opracowane oryginalne nowe rozwiązanie konstrukcyjne bezszczotkowego silnika wzbudzanego magnesami trwałymi, do którego wirnika wbudowana jest pompa wyporowa. Rozwiązanie to zostało nagrodzone: **złotym medalem** na **Międzynarodowej Warszawskiej Wystawie Wynalazków IWIS 2017** oraz srebrnym medalem na **Międzynarodowych Targach Wynalazków i Innowacji INTARG 2017** w Katowicach.

Opracowany podczas realizacji Projektu NCBiR silnik wzbudzany magnesami trwałymi do którego wbudowana jest pompa łopatkowa prezentowany był podczas Konferencji Naukowo - Technicznej „Energoszczędne napędy elektryczne w przemyśle” 25.04.2018r. w ramach Targów EXPO-POWER 2018 na Międzynarodowych Targach Poznańskich.

Innym oryginalnym osiągnięciem autora wniosku jest współautorstwo nowego rozwiązania konstrukcyjnego wirnika silnika z magnesami trwałymi. W wirniku tym w wydrążonym dia- lub para-magnetycznym elemencie zamontowana może być wirująca część napędzanej maszyny roboczej, dzięki czemu układ silnik – maszyna robocza może posiadać mniejszą objętość. Usytuowany w silniku element dia- lub paramagnetyczny zabezpiecza przed wnikaniem strumienia magnetycznego do elementów maszyny roboczej, które są wbudowane w wirnik silnika. Opracowane rozwiązanie zostało zgłoszone do opatentowania: Marek P. Ciurys, Ignacy Dudzikowski, Krzysztof Mikrut, *Wirnik silnika z magnesami trwałymi*. Numer zgłoszenia P.4269540 z dnia 7.09.2018 r.

Autor wniosku kierował pracami badawczymi w ramach projektu pt. „Maszyny elektryczne o magnesach trwałych – analiza, badania” – etap 1 (01.10.2011 – 30.09.2012 r.), etap 2 (29.05.2013 – 30.09.2014 r.) oraz etap 3 (12.06.2014 – 30.09.2015), finansowanego z

dotacji celowej na finansowanie działalności polegającej na prowadzeniu badań naukowych lub prac rozwojowych oraz zadań z nimi związanych, służących rozwojowi młodych naukowców na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej.

Habilitant brał udział w projekcie współfinansowanym przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego „*Młoda kadra 2015 plus. Wzbogacanie oferty dydaktycznej Politechniki Wrocławskiej w zakresie ogólnouczeniowych przedmiotów wybieralnych oraz wdrożenie nowych Interdyscyplinarnych Studiów Doktoranckich*”. W projekcie tym autor otrzymał stypendium naukowo-badawcze na realizację badań „*Analiza wpływu rodzaju oraz wymiarów obwodu magnetycznego na parametry oraz na pracę silników bezszczotkowych prądu stałego*” w okresie od 1.10.2013 do 30.09.2014r.

Autor wniosku uczestniczył również w dwóch projektach: “Staż sukcesem naukowca” oraz “Kluczowy stażysta” organizowanych przez Poznański Akademicki Inkubator Przedsiębiorczości. Projekty te były współfinansowane przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego. W ramach tych projektów autor odbył staże w firmie DB Energy SA. Tematem staży była „*Analiza wykorzystania i energochłonności różnych typów silników elektrycznych w przemyśle*” oraz „*Opracowanie i implementacja algorytmu pozwalającego na ograniczenie energochłonności silników elektrycznych wykorzystywanych w przemyśle*”. Podczas uczestnictwa w programach dla naukowców „Staż Sukcesem Naukowca” oraz „Kluczowy Stażysta” autor uczestniczył w opracowaniu ponad 30 raportów jakości energii elektrycznej oraz 11 opracowań z analizy energochłonności pracy maszyn elektrycznych oraz audytów elektroenergetycznych w przedsiębiorstwach w całej Polsce.

Poza działalnością naukową i organizacyjną **autor wniosku aktywnie prowadzi działalność dydaktyczną i w zakresie popularyzacji wiedzy**. W latach 2009 – 2019 autor poprowadził ponad 2700 godzin zajęć dydaktycznych dla Studentów Wydziału Elektrycznego i Wydziału Mechanicznego. Prowadził przedmioty takie jak: Maszyny elektryczne 1, Maszyny elektryczne 2, Maszyny elektryczne 3, Mikromaszyny elektryczne dla automatyki przemysłowej, Układy elektromaszynowe w energetyce odnawialnej, Elektrotechnika, Pomiary przemysłowe, Pomiary w aparaturze procesowej, Pomiary wielkości nieelektrycznych, Podstawy metrologii, Grafika inżynierska. W 2018 roku prowadził zajęcia dla uczniów szkół średnich w ramach „*Programu współpracy Politechniki Wrocławskiej ze szkołami ponadgimnazjalnymi z Dolnego Śląska*”. W latach 2009-2012 prowadził zajęcia w ramach „*Dni Otwartych Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej*”. Aktywnie uczestniczył (prowadząc zajęcia edukacyjne dla młodzieży) również w XIII Dolnośląskim Festiwalu Nauki na Politechnice Wrocławskiej w 2010 roku.

Autor wniosku włączył studentów Politechniki Wrocławskiej w prace badawcze prowadzone w ramach projektu badawczego NCBiR, w programie PBS. Wynikiem są 4 prace dyplomowe i współautorstwo studentów w 2 raportach. Włączył studentów Politechniki Wrocławskiej w inne prace badawcze. W wyniku ich realizacji powstały 4 publikacje naukowe, których współautorami byli studenci Politechniki Wrocławskiej. Autor wziął udział w programie telewizyjnym Telewizji Polskiej Oddział Wrocław pt.: „Co dalej gimnazjalisto” (data emisji 12-05-2012r.). Wypromował 21 dyplomantów. W swojej działalności dydaktycznej przygotował i uruchomił pięć stanowisk laboratoryjnych do przedmiotu „Mikromaszyny elektryczne dla automatyki przemysłowej” oraz trzy stanowiska laboratoryjne do przedmiotu „Maszyny elektryczne z magnesami trwałymi”. Autor wniosku opracował również oprogramowanie służące do pomiarów oraz wizualizacji przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w maszynach elektrycznych. Opracowane oprogramowanie wykorzystywane jest podczas prowadzonych zajęć dla studentów Wydziału Elektrycznego i Wydziału Mechanicznego. Autor wniosku był również opiekunem wycieczek dydaktycznych studentów Politechniki Wrocławskiej do przedsiębiorstw województwa dolnośląskiego (m.in. do ZEM Sp. z o. o. w Dusznikach Zdroju, Zakładów Górniczych Polkowice- Sierszowice). Ukończył Kurs Dydaktyczny Szkoły Wyższej organizowany przez Studium Nauk Humanistycznych Politechniki Wrocławskiej w 2012 r. W latach 2014 - 2018 był Członkiem Komisji Egzaminów Dyplomowych inżynierskich i magisterskich na kierunku Elektrotechnika na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej. Jest opiekunem przedmiotów „*Mikromaszyny elektryczne dla automatyki przemysłowej*”, „*Maszyny elektryczne z magnesami trwałymi*”, „*Elektrotechnika*”.

Od 1.10.2018 roku autor wniosku jest Kierownikiem Zespołu Naukowo-Dydaktycznego Maszyn i Pomiarów Elektrycznych oraz Członkiem Komisji ds. badań naukowych w zakresie maszyn, napędów i pomiarów elektrycznych Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej. Jest również Członkiem Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej oraz Kierownikiem Laboratorium Elektrotechniki w Katedrze Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych.

