

Szczecin, 15.09.2017 r.

Dr inż. Konrad Woronowicz  
Bombardier Transportation  
Kingston, Ontario, Canada

## AUTOREFERAT DOROBKU I OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH

### 1. Dane osobowe

data urodzenia: 31.12.1960 r., miejsce urodzenia: Szczecin

### 2. Wykształcenie

1967 – 1975 Szkoła podstawowa nr 1 w Szczecinie

1975 – 1979 Liceum ogólnokształcące nr 1 im. Marii Skłodowskiej-Curie  
w Szczecinie. Profil klasy: matematyczno-fizyczny

1979 – 1984 Studia wyższe: Politechnika Szczecińska, Wydział Elektryczny;  
Specjalność: Napędy Elektryczne

### Stopnie Naukowe

1984 **Praca dyplomowa - Wydział Elektryczny Politechniki Szczecińskiej**  
„METODY MODULACJI NAPIĘCIA W TRÓJFAZOWYCH  
PRZEKSZTAŁTNIKACH CZĘSTOTLIWOŚCI”  
Wydział Elektryczny Politechniki Szczecińskiej

2001 **Rozprawa doktorska – Wydział Elektryczny Politechniki Szczecińskiej**  
„WEKTOROWO ZORIENTOWANA METODA STEROWANIA  
INDUKCYJNYCH SILNIKÓW LINIOWYCH Z KOMPENSACJĄ  
PARAMETRÓW SZYNY REAKCYJNEJ”  
Wydział Elektryczny Politechniki Szczecińskiej  
Uzyskany stopień: doktor nauk technicznych w zakresie elektrotechniki. Praca  
obroniona w grudniu 2001 roku, z wyróżnieniem.

#### **Promotor:**

prof. dr hab. inż. Ryszard Pałka

#### **Recenzenci:**

1. prof. dr hab. inż. Marian P. Kaźmierkowski  
Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Uniwersytet Warszawski
2. prof. dr. inż. Ryszard Sikora  
Instytut Elektrotechniki Politechniki Szczecińskiej

**3. Przebieg pracy zawodowej - zajmowane stanowiska**

1.	Styczeń 1995 - obecnie	Bombardier Transportation, Kingston, Kanada	Fellow Expert
2.	Luty 2016 - obecnie	Uniwersytet Technologiczny Ontario, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej	Adiunkt
3.	Maj 1991 - Grudzień 1994	CTS of Canada Limited, Toronto, Kanada	Inżynier Projektant
4.	Marzec 1990 - Maj 1991	Polytronics Engineering Ltd., Toronto, Kanada	Inżynier w dziale R&D
5.	Maj 1984 - Luty 1990	Politechnika Szczecińska, Wydział Elektryczny, Zakład Maszyn i Napędów Elektrycznych	Asystent

**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.) w okresie po uzyskaniu stopnia doktora.**

**a) Tytuł osiągnięcia naukowego:**

**Opracowanie metod analizy układów zasilających oraz zasad kształtowania cewek i materiałów magnetycznych transformatorów w systemach do bezprzewodowego przekazywania energii średniej i dużej mocy.**

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

Na osiągnięcie naukowe składa się cykl 11 publikacji i 10 patentów.

**Publikacje:**

[A1] **K. Woronowicz; A Safaee**; *A practical approach to inductive power transfer systems for transportation applications using Boucherot bridge method*; Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2014 IEEE; DOI:10.1109/ITEC.2014.6861772; Page(s):1-6

[A2] **A. Safaee, K. Woronowicz**; *Tuning Scheme for Three-Phase Wireless Power Transfer Systems with Long Primary*; International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE'14), UOIT, Oshawa, ON, 11-13 August 2014

[A3] K. Woronowicz, A. Safaee; *Parallel Compensation in Wireless Power Transfer*; International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE'14), UOIT, Oshawa, ON, 11-13 August 2014

[A4] K. Woronowicz, A. Safaee, T. Dickson; *A general approach to tuning of a dual secondary winding transformer for wireless power transfer*; Electric Vehicle Conference (IEVC), 2014 IEEE International. IEEE, 2014

[A5] K. Woronowicz, A. Safaee, T. Dickson, M. Youssef, S. Williamson; *Boucherot bridge based zero reactive power inductive power transfer topologies with a single-phase transformer* In Electric Vehicle Conference (IEVC), 2014 IEEE International (pp. 1-6). IEEE DOI: 10.1109/IEVC.2014.7056229

[A6] Safaee, K. Woronowicz, T. Dickson; *Reactive power compensation in three phase high output inductive power transfer*; Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 26-28 Oct. 2015 IEEE; DOI: 10.1109/EPEC.2015.7379979

[A7] K. Woronowicz, A. Safaee, T. Dickson; *A misalignment-tolerant wireless power transfer system for transportation applications*; Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2015 IEEE, 14-17 June 2015; 1-5; DOI: 10.1109/ITEC.2015.7165743

[A8] K. Woronowicz, A. Safaee, T. Dickson; *Single-Phase Zero Reactive Power Wireless Power Transfer Topologies Based on Boucherot Bridge Circuit Concept*; Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering (Volume: 38, Issue: 4, Fall 2015); Page(s):323-337

[A9] K. Woronowicz, A. Safaee, T. Dickson; *A general approach to tuning of a dual secondary winding transformer for inductive power transfer*; Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2015 IEEE; Pages: 1-6

[A10] K. Woronowicz, A. Safaee, T. Dickson, B. Koushki; *Effects of parallel load-side compensation in wireless power transfer*; Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2015 IEEE; Pages: 369-374; DOI: 10.1109/EPEC.2015.7379978

[A11] A. Safaee, K. Woronowicz; *Time-Domain Analysis of Voltage-Driven Series-Series Compensated Inductive Power Transfer Topology*; IEEE Transactions on Power Electronics (Volume: 32, Issue: 7, July 2017); Page(s): 4981- 5003

#### Patenty:

Lp.	Tytuł patentu	Autorzy	Data publikacji	URL
[P1] 9517697	Providing a vehicle with electric energy using a receiving device adapted to receive an alternating electromagnetic field.	K. Woronowicz, R. Czaiński	Grudzień 2016	<a href="https://www.google.com/patents/US9517697">https://www.google.com/patents/US9517697</a>
[P2] 2016030 1250	Method of Operating a Three Phase Primary Winding Structure and a Primary Unit.	K. Woronowicz, R. Czaiński, D. Anders, A. Safaee	Listopad 2014	<a href="http://patents.justia.com/patent/20160301250">http://patents.justia.com/patent/20160301250</a>
[P3] 9331527	System and method for transferring electric energy	K. Woronowicz	Maj 2016	<a href="http://patents.justia.com/patent/9331527">http://patents.justia.com/patent/9331527</a>

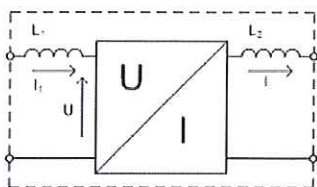
	to a vehicle using segments of a conductor arrangement which can be operated independently.			
[P4] 9327602	Inductively transferring electric energy to a vehicle using consecutive segments which are operated at the same time.	K. Woronowicz, R. Czaiński	Maj 2016	<a href="http://patents.justia.com/patent/9327602">http://patents.justia.com/patent/9327602</a>
[P6] 2015008 4406	Arrangement and method for providing a vehicle with electric energy by magnetic induction	K. Woronowicz, R. Czaiński	Marzec 2015	<a href="http://patents.justia.com/patent/20150084406">http://patents.justia.com/patent/20150084406</a>
[P7] 2015003 5355	System for Inductively Transferring Electric Energy to a Vehicle Using Consecutive Segments	K. Woronowicz, R. Czaiński, D. Anders, T. Nikles, M. Soehngen	Luty 2015	<a href="https://www.google.com/patents/US20150035355">https://www.google.com/patents/US20150035355</a>
[P8] 2013005 7204	System and Method for Transferring Electric Energy to a Vehicle	K. Vollenwyder, T. Dickson, K. Woronowicz	Marzec 2013	<a href="https://www.google.com/patents/US20130057204">https://www.google.com/patents/US20130057204</a>
[P9] 2012032 6498	Providing a plurality of vehicles, in particular track bound vehicles, with electric energy	K. Woronowicz, K. Vollenwyder, T. Dickson	Grudzień 2012	<a href="https://www.google.com/patents/US20120326498">https://www.google.com/patents/US20120326498</a>
[P10] 2016131 767 A1	Power transfer unit of a system for inductive power transfer, a method of manufacturing a primary power transfer unit and of operating a primary power transfer unit	K. Woronowicz, R. Czaiński	Sierpień 25, 2016	<a href="https://www.google.com/patents/WO2016131767A1?cl=fi">https://www.google.com/patents/WO2016131767A1?cl=fi</a>

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

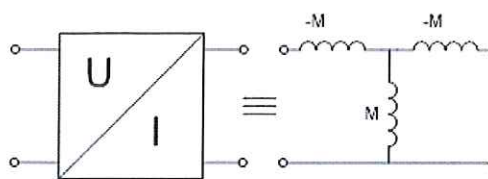
Bezprzewodowe, lub indukcyjne, Przesyłanie Energii (BPE) jest stosunkowo nową dziedziną spopularyzowaną przede wszystkim dzięki rozwojowi technologii pozwalających na efektywne magazynowanie energii, głównie w bateriach i superkondensatorach, i w związku z tym wzrastające zainteresowaniem zastosowaniem tych technologii w pojazdach opartych na napędzie elektrycznym, głównie w autobusach i samochodach elektrycznych, ale również w pojazdach szynowych, takich jak tramwaje. Szybki postęp w dziedzinie BPE został również umożliwiony poprzez równoległy dynamiczny rozwój w dziedzinach technologii urządzeń energoelektronicznych; sterowania jak i komercjalizacji narzędzi wspomagających obliczenia elektromagnetyczne. Początkowa koncepcja stacjonarnego bezprzewodowego

ładowania baterii samochodowych poszerzona została w stosunkowo krótkim czasie do takich zastosowań jak dynamiczne ładowania pojazdów (w ruchu) i ostatecznie do ciągłego zasilania pojazdów, bez potrzeby użycia baterii lub innego środka magazynowania energii na ich pokładzie. W początkowym okresie dynamicznego rozwoju tej dziedziny, lata 2005-2007, z uwagi na brak standardu dotyczącego częstotliwości zasilania w systemach BPE, różne ośrodki badawcze proponowały różne pasma, w granicach od 20 kHz do 150 kHz i nawet w zakresie jednego megaherca. W niedługim czasie przedmiotem badań stały się również układy mające zastosowanie nie tylko w samochodach osobowych i autobusach, ale również w samochodach ciężarowych czy pojazdach szynowych. Z uwagi na różnice w wymogach dotyczących mocy ładowania baterii, między samochodami osobowymi i autobusami lub tramwajami, prace nad standardem dotyczącym BPE doprowadziły do wyszczególnienia odrębnych wymagań dla pojazdów wymagających mocy ładowania w zakresie kilku do kilkunastu kilowatów i odrębnych dla mocy powyżej 150 kW. Na dzień dzisiejszy 85 kHz jest ogólnie przyjętą częstotliwością w niższym zakresie mocy, natomiast 20 kHz, z uwagi na istniejące i działające już urządzenia, w wyższym zakresie mocy. Niemniej, pojawiły się już pierwsze próby zastosowania częstotliwości 85 kHz w wyższym pałapie moce, około 200 kW. Kolejnym bardzo ważnym czynnikiem ograniczającym zastosowanie BPE jest limit emisji pola magnetycznego, który w obecnym czasie został przyjęty jako 6.25 uT. Z uwagi na „otwartą” strukturę transformatorów systemów BPE, uzyskanie emisji poniżej tego limitu jest jednym z głównych wyzwań projektowych i inżynierskich, szczególnie w zakresie mocy powyżej 150 kW.

Moja praca badawcza związana z BPE rozpoczęła się około roku 2008, zaraz po ukończeniu pracy nad urządzeniem magazynującym energię hamowania elektrycznych pojazdów trakcyjnych przy wykorzystaniu komutacyjnych obwodów rezonansowych. Z uwagi na występowanie podobnych zjawisk w tych dwóch zagadnieniach, skierowałem moje zainteresowania w stronę BPE. Moim pierwszym osiągnięciem naukowym było opisanie i zdefiniowanie praktycznego podejścia do analizy systemów BPE [A1]. Z uwagi na wysoką częstotliwość operacji i znaczną indukcyjność rozproszenia transformatora, zachodzi konieczność kompensacji mocy biernej w taki sposób, aby uzyskać przełączanie kluczy mocy przy zerowym prądzie wejściowym mostka zasilającego. Zaobserwowałem, że każdy obwód rezonansowy LC poddany wymuszeniu przy częstotliwości rezonansowej, którego jeden z biernych elementów jest obciążony dowolną impedancją, może być traktowany jako źródło prądu zależne wyłącznie od źródła napięcia i indukcyjności (bądź pojemności) obwodu rezonansowego, oraz że warunkiem przełączania przy prądzie zerowym jest równość reaktancji obciążenia i reaktancji indukcyjnej bądź pojemnościowej (lub ogólnie impedancji charakterystycznej) obwodu rezonansowego. Jednocześnie, co również przedstawione zostało w [5], zaproponowałem przedstawienie modelu transformatora do BPE jako samostrojącego się źródła prądu z elementami reaktancyjnymi o wartościach odpowiadających indukcyjności własnej strony pierwotnej jak i wtórnej transformatora, umieszczonymi odpowiednio po stronie pierwotnej oraz wtórnej źródła prądu, jak pokazano na rysunku zamieszczonym poniżej – Rysunek 1. Te obserwacje, jak również fakt, że impedancja transferowana do strony pierwotnej źródła prądu jest zdefiniowana w bardzo prosty sposób, pozwalają na bardzo szybką, niemal intuicyjną analizę pracy każdej topologii układu do bezprzewodowego przekazywania energii.



Rys. 1a Model transformatora BPE

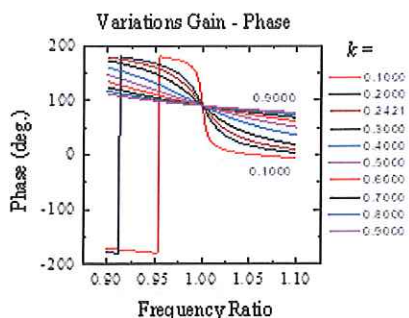


Rys. 1b Skompensowane źródło prądu

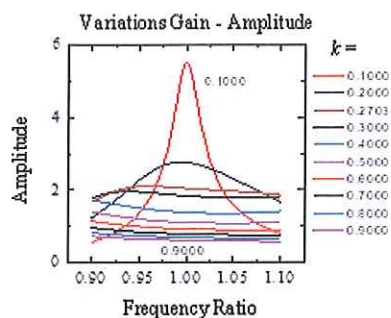
Szczegółowa analiza czterech podstawowych topologii stosowanych w BPE, oparta na obserwacjach opisanych powyżej, przedstawiona została w [A5]. W pracy tej, wykorzystującej metodę Aproksymacji Pierwszej Harmonicznej (ang. FHA – First Harmonic Approximation) opisane zostały zależności między wielkościami wejściowymi i wyjściowymi każdej z czterech topologii oraz wyrażenia na moc przenoszoną przy identycznych warunkach zasilania i identycznym obciążeniu, jak również dobór elementów kompensujących moc bierną na wejściu systemu. Dodatkowym celem pracy było pokazanie praktycznych wielkości pola magnetycznego, praktycznych rozmiarów uzwojeń transformatora i praktycznych wartości ich indukcyjności, a w konsekwencji odpowiednich pojemnościowych elementów kompensacyjnych. Obliczenia elektromagnetyczne wykonane zostały przy pomocy programu Maxwell3D i pozwoliły na unaocznienie praktycznych różnic pomiędzy czterema metodami kompensacji w odniesieniu do prądów napięć i emisji.

W dalszym ciągu pracy badawczej nad porównaniem czterech topologii BPE (przedstawionym w [A8]), zająłem się zagadnieniem zmian napięcia wyjściowego, znormalizowanego względem napięcia wejściowego, i impedancji wejściowej w zależności od współczynnika sprzężenia transformatora  $k = M/\sqrt{L_1 L_2}$ , a w konsekwencji w funkcji względnego położenia uzwojeń, oraz w funkcji częstotliwości względnej – odniesionej do częstotliwości rezonansowej – wszystko przy wykorzystaniu koncepcji źródła prądu opisanego powyżej. Przy założeniu znanej mocy wyjściowej oraz znanego stałego napięcia wyjściowego i przy zastosowaniu metody równorzędnej rezystancji dla prądu zmiennego, wyniki analizy pozwoliły scharakteryzować i unaocznić różnice w wymaganiach prądowo-napięciowych źródła zasilania pomiędzy badanymi topologiami.

Jednocześnie zająłem się wpływem rodzaju wybranej metody kompensacji mocy biernej na konstrukcje uzwojenia transformatora przy założeniu identycznych, dla każdej topologii, warunków napięciowych i obciążenia. Analiza częstotliwościowa tak uzyskanych systemów BPE unaocniła wpływ wybranej topologii na potencjalne problemy związane z ich sterowaniem, a w szczególności tzw. „phase skipping” czyli zmianę o 180 stopni fazy napięcia wyjściowego przy zmianie względnego położenia uzwojeń transformatora (współczynnik  $k$ ), jak i szybkość zmiany napięcia przy regulacji częstotliwości w funkcji tego położenia, co pokazano w poniższym rysunku – Rysunek 2.



Rys. 2a Zmiana fazy spowodowana zmianą częstotliwości w funkcji współczynnika sprzężenia



Rys. 2b Wzmocnienie napięcia w funkcji współczynnika sprzężenia

Topologia związana z kompensacją szeregowo-równoległą była przedmiotem szczegółowej analizy przedstawionej w [A3, A10]. W pracy tej pokazałem, przy użyciu modelu transformatora BPE jako źródła prądu, sposób doboru elementów kompensacyjnych strony pierwotnej w celu uniknięcia pojemnościowego charakteru prądu pierwotnego i zdefiniowałem miejsce oscylacji mocy biernej.

Równolegle z badaniami nad jednofazowymi układami BPE średnich mocy, w polu moich zainteresowań znalazły się układy trójfazowe, nad którymi badania pozwoliły ostatecznie na zbudowanie systemu BPE do zasilania pojazdów trakcyjnych transportu miejskiego. Moje zainteresowania skupiły się na metodach kompensacji mocy biernej w układach trójfazowych oraz problemy związane z kształtem i formą uzwojeń i „miękkich” magnetyków używanych do konstrukcji transformatora w celu poprawienia sprawności oraz minimalizacji emisji pola magnetycznego. Z uwagi na wysokie wymagania odnośnie przekazywanej mocy, powyżej 200 kW, ówczesne istniejące rozwiązania nie spełniały wymagań dotyczących wydajności ani poziomu emisji pola magnetycznego i elektromagnetycznego, które to wymagania okazało się jednym z najtrudniejszych do spełnienia i do dnia dzisiejszego jest jednym z najistotniejszych zjawisk ograniczających zastosowanie systemów bezprzewodowego przekazywania energii średnich i dużych mocy.

Rezultatem badań i pracy nad powyższym zagadnieniem były publikacje oraz szereg patentów umożliwiających jego praktyczne rozwiązanie spełniające wymagane normy i standardy oraz pozwalające na homologację i praktyczne zastosowanie układów do zasilania autobusów (Berlin, Brunzwik) i pojazdów trakcyjnych (Augsburg).

Z uwagi na wielkość napięć indukowanych w indukcyjnościach własnych strony wtórnej przez prądy obciążenia, a co za tym idzie kompensacji zwojowej oraz konieczności mechanicznego rozłożenia faz transformatora w formie kilku odrębnych cewek oraz mechanicznego przesunięcia faz w celu zachowania korelacji między uzwojeniem pierwotnym i wtórnym, powstała potrzeba bardzo dokładnego obliczenia magnetycznych sprzężeń wielouzwojeniowego transformatora jak również sformułowanie wzorów na wartości kondensatorów kompensacyjnych. Publikacje [A2, A6] są rezultatem moich badań nad zdefiniowaniem ogólnych zasad kompensacji w trójfazowych transformatorach wielouzwojeniowych wykorzystywanych do BPE. Przedstawiają one wyniki obliczeń

elektromagnetycznych modelu układu praktycznego, dokonanych przy użyciu programu Maxwell3D.

Praca nad wykorzystaniem układów trójfazowych do BPE doprowadziła do uzyskania szeregu patentów związanych z kształtem, sposobem rozkładu uzwojenia jak i jego ekranowaniem. I tak, z uwagi na bardzo wysokie wartości prądu trójfazowego uzwojenia pierwotnego zaszła potrzeba opracowania kształtu ich cewek, ograniczającego pole magnetyczne w obszarze cewek krańcowych. Rezultatem tej pracy był patent [P6], dzięki któremu emisja pola w krańcowych rejonach uzwojenia pierwotnego została ograniczona do wartości występującej w okolicy geometrycznego środka uzwojenia pierwotnego co pozwoliło na konstrukcję i homologację systemu ładowania statycznego dla autobusów, opartego na krótkim (8 m) uzwojeniu pierwotnym.

W dalszym ciągu badań nad systemami trójfazowymi, moja praca koncentrowała się na wykryciu zależności pomiędzy kształtem uzwojenia części wtórnej transformatora a poziomem emisji pola magnetycznego. Odkryte zależności zostały objęte patentem, [P1] i pozwoliły na ponad dwukrotne zmniejszenie maksymalnej emisji systemu i osiągnięcie poziomu emisji poniżej limitu uznanego przez międzynarodowe standardy, takie jak np. ICNIRP (International Commission for non-Ionizing Radiation Protection).

Praca związana z bezpiecznym działaniem trójfazowych systemów BPE, pozwalającym na ciągłe zasilanie pojazdów trakcyjnych oraz zminimalizowanie liczby inwerterów zasilających stała się podstawą kilku kolejnych patentów np. [P 3,4]. Patenty te opisują, między innymi, sposób na generowanie ciągłego pola magnetycznego poprzez odpowiednie ukształtowanie rozłożonego uzwojenia trójfazowego bieźni dla ładowania dynamicznego pojazdów oraz topologie i sposób przełączania źródła prądu w celu optymalizacji kosztów i strat mocy systemu zasilającego. Dzięki mojemu wkładowi w rozwój układów trójfazowych, możliwe było otrzymanie homologacji na zastosowanie systemu BPE w pojazdach trakcyjnych – Augsburg (ładowanie dynamiczne), jak również autobusów – Berlin i Brunshwik (ładowanie statyczne).

W trakcie budowy praktycznego systemu BPE dla autobusów pojawiło się dodatkowe wymaganie stworzenia układu BPE umożliwiającego jednoczesne generowanie kilku różnych napięć wyjściowych w układach z szeregową kompensacją strony pierwotnej. Analizie poddałem trzy układy BPE utworzone na podstawie różnych kombinacji kompensacji strony wtórnej – SS, SP, PP. Rezultatem pracy było zdefiniowanie warunków pełnej kompensacji mocy biernej po stronie źródła i niezależności napięć wyjściowych od obciążenia oraz stworzenie praktycznego modelu analitycznego przy wykorzystaniu wcześniejszego modelu transformatora opartego na koncepcji źródła prądu. Praca doprowadziła do dwóch publikacji [A4, A9], podsumowujących wyniki powyżej opisanych badań.

Po ukończeniu badań nad trójfazowymi systemami BPE i systemami z transformatorem wielouzwojeniowym (trójuzwojeniowym), powróciłem do pracy nad systemami mniejszej mocy (3.2 – 3.7 kW), nadającymi się do ładowania baterii samochodów osobowych, głównie w celu opracowania możliwości zwiększenia tolerancji systemów ładowania na niewspółosiowość położenia uzwojeń transformatora. W pracy tej poddałem analizie różne kształty uzwojeń strony wtórnej transformatora pod kątem zmiany napięcia indukowanego przy zmianie wzajemnego położenia strony pierwotnej i wtórnej transformatora. W rezultacie

możliwe było dobranie kombinacji uzwojeń minimalizujących zmiany strumienia sprzężonego, a co za tym idzie, napięcia indukowanego strony wtórnej przy fizycznym odchyleniu strony wtórnej od położenia współosiowego. W dalszej części pracy pokazałem sposób optymalizacji tak dobranych uzwojeń wtórnych, ograniczonych przestrzennie, przy wykorzystaniu symulacyjnego programu Maxwell3D. Badania zostały podsumowane i przedstawione w publikacji [A7]. W dalszej części programu badań nad rozszerzeniem zakresu pracy systemów BPE dla samochodów elektrycznych zaadoptowałem rozwiązanie wykorzystujące trójfazowe, rozłożone uzwojenie pierwotne. Sposób sterowania falownika zasilającego wraz z fizyczną formą uzwojenia pierwotnego podległy ochronie patentowej [P2]. Przy wykorzystaniu tego patentu, zbudowany został pierwszy prototyp bezprzewodowego ładowania baterii pod patronatem firmy Audi.

Moim ostatnim osiągnięciem naukowym jest dokładna analiza w domenie czasowej systemu BPE z kompensacją szeregową przy zasilaniu inwerterem napięcia i obciążeniu prostownikowym przy wykorzystaniu metody przestrzeni stanów [A11]. Dokładne obliczenia pozwoliły na identyfikację wszystkich możliwych trybów pracy systemu i analityczny opis zmiennych stanu, jak również definicję warunków granicznych przejścia pomiędzy istniejącymi stanami. Obliczenia przeprowadzone zostały przy założeniu czterech stopni swobody, z których dwa związane są z elektrycznymi parametrami źródła zasilania (częstotliwość względna i napięcie wejściowe odniesione do napięcia wyjściowego), a pozostałe dwa z parametrami konstrukcyjnymi transformatora (współczynnik sprzężenia i stosunek indukcyjności własnej strony pierwotnej i wtórnej). Zastosowanie powyższej analizy umożliwia identyfikację względnego położenia uzwojeń transformatora w czasie rzeczywistym i dostosowanie parametrów zasilania w celu ustalenia wymaganego, optymalnego punktu pracy systemu. Publikacja zawiera w sobie aplikację dostępną dla czytelnika (tzw. media files) napisaną w programie Matlab, umożliwiającą natychmiastową wizualizację przebiegów czasowych prądów i napięć jak i granic pomiędzy trybami pracy przy czterech stopniach swobody określonymi, jak wspomniano powyżej, parametrami konstrukcyjnymi oraz parametrami źródła zasilania.

Obecnie, w momencie pisania Autoreferatu, moje zainteresowania badawcze skupiają się na zagadnieniach dotyczących minimalizacji strat mocy w celu osiągnięcia dopuszczalnego poziomu temperatury dotyku, identyfikacji stanów pracy układów BPE przy zastosowaniu przesunięcia fazowego w inwerterach mostkowych, jak również na optymalizacji uzwojeń i szyny reakcyjnej silnika liniowego pod kątem zmniejszenia efektu końcowego i minimalizacji strat.

## **5. Charakterystyka dodatkowych prac naukowo badawczych po uzyskaniu stopnia naukowego doktora (2001-2017)**

Moja praca badawcza w okresie po uzyskaniu stopnia doktora skupiona była wokół tematu elektromechanicznego przetwarzania energii w zastosowaniu do szynowego transportu trakcyjnego. Badania obejmowały wszystkie aspekty związane z przepływem energii między pojazdem i układem zasilającym bądź odbierającym energię. Badaniom podlegały również takie dziedziny, jak sterowanie napędem trakcyjnym, projektowanie zasilacza (inwertera) do zasilania silnika trakcyjnego, obliczenia elektromagnetyczne indukcyjnego silnika liniowego, systemy bezprzewodowego przekazywania energii, urządzenia do magazynowania energii

hamowania pojazdów trakcyjnych, jak również pomniejsze układy energoelektroniczne, takie jak niskonapięciowe zasilacze telekomunikacyjne.

Początkowo, zaraz po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych, moja praca naukowo-nadawcza koncentrowała się na możliwościach wdrożenia metody wektorowej sterowania napędem trakcyjnym opartym na silniku liniowym indukcyjnym. Program badawczy zawierał szeroki wachlarz obowiązków związanych ze stworzeniem adaptacyjnego algorytmu sterowania silnikiem liniowym oraz zaprojektowania jednostki zasilającej silnik w taki sposób by spełniały one wymagania stawiane napędom trakcyjnym zgodnie z obowiązującymi międzynarodowymi standardami, łącznie ze standardami środowiskowymi oraz bezpieczeństwa. Praca badawcza podzielona została na szereg odrębnych zagadnień, których rozwiązanie zaowocowało wprowadzeniem nowego sposobu sterowania napędem silnika liniowego. Zagadnienia te to:

1. Obliczenia systemowe w celu uzyskania wartości obciążenia silnika liniowego i jednostki zasilającej przy wykorzystaniu programów VISSIM oraz Matlab.
2. Obliczenia termiczne silnika, inwertera oraz filtra po stronie prądu stałego. Ta praca zaowocowała stworzeniem nowego dokładnego algorytmu śledzenia zmian temperatury silnika oraz kluczowych elementów magnetycznych.
3. Obliczenia wartości parametrów filtra wejściowego oraz filtrów EMI. Praca wymagała użycia programów symulacyjnych pól magnetycznych i obwodów elektrycznych
4. Koncepcja oraz zaprojektowanie obwodu bezpiecznego wyłączenia napędu z wykorzystaniem zasady redundancji i detekcji jej utraty.
5. Optymalizacja algorytmu sterowania przy wykorzystaniu kryterium minimum strat.
6. Implementacja algorytmu sterowania w sterowniku mikroprocesorowym.
7. Zorganizowanie i przeprowadzenie całościowego programu kwalifikacyjnego zintegrowanego napędu trakcyjnego, a następnie jego homologacji.

Zoptymalizowany system kontroli silnika liniowego mojego autorstwa został wdrożony i stanowi podstawę napędu takich systemów transportowych, jak: kanadyjski „Vancouver Sky Train”, malezyjski „Kelana Jaya Light Rail Transit”, koreański „Yongin Ever Line”, chiński „Beijing Subway and Airport Express”, czy amerykański system „AirTrain JFK”.

Praca nad metodą sterowania silnika zaowocowała dwiema publikacjami [C1,B1], które ukazały się w latach 2002 i 2004. Z uwagi na charakter działalności firmy, w której pracowałem, kilka prac w tej dziedzinie nie zostało opublikowanych ze względu na wymagania związane z ochroną własności intelektualnej mojej firmy. W międzyczasie, w celu lepszego uwzględnienia efektu końcowego w układzie kontrolnym, opracowałem metodę korekcji indukcyjności silnika w funkcji prędkości przy nasyceniu magnetycznym, co również zaowocowało dwiema publikacjami [C4,B2].

Równolegle, moja praca badawcza związana również była z projektowaniem urządzeń do magazynowania energii hamowania pojazdów trakcyjnych przy użyciu superkondensatorów. Metody i rozwiązania związane z tym projektem zostały zastosowane w urządzeniu działającym przy napięciu nominalnym 750 V DC i mocy maksymalnej 380 kW, a następnie wdrożone do produkcji pod nazwą „Bombardier EnerGstore”. Ta praca zaowocowała dwoma patentami. Jeden dotyczy metody sterowania częstotliwością i wypełnieniem impulsów

mostka trójfazowego z pomocniczym obwodem rezonansowym, natomiast drugi umożliwia minimalizację strat w dwukierunkowym konwerterze DC-DC przy bardzo dużym zakresie zmian stosunku napięcia wyjściowego do wejściowego [PB1,PB4].

Jednocześnie byłem współautorem nowatorskiego projektu stwarzającego podstawy nowej koncepcji transportu liniowego – Autoshuttle – polegającej na transporcie pojazdów samochodowych przy wykorzystaniu istniejącego systemu autostrad. Ten program zakończył się publikacją [C5], w której nakreślone zostały podstawy techniczne i ekonomiczne takiego systemu.

We współpracy z jednym z lokalnych uniwersytetów zaangażowany byłem jako koordynator programu opracowania wielopoziomowego inwertera do zasilania napędów wykorzystujących silniki liniowe. Zaowocowało to publikacją [B3,C9].

Z uwagi na moje doświadczenie w projektowaniu obwodów rezonansowych zdobyte przy pracy nad BPE, zostałem zaangażowany w kilka projektów związanych z topologią i sterowaniem zasilaczy DC-DC małej mocy (publikacje [C2,C6,C7,C8]).

W ostatnich dwóch latach moja praca koncentruje się na modyfikacji indukcyjnego silnika liniowego, a w szczególności polepszeniu jego osiągnięć poprzez zwiększenie sprawności i siły ciągu przy niezmiennym napięciu i gabarytach. W celu identyfikacji parametrów mających wpływ na siłę ciągu i sprawność, zdecydowałem się na bardzo gruntowne podejście do analizy zagadnienia poprzez rozwiązanie analityczne równań silnika w układzie 2D i porównanie wyników obliczeń analitycznych z symulacjami przeprowadzonymi przy użyciu różnych programów do symulacji pól elektromagnetycznych, głównie COMSOL i Maxwell. Porównaniu podległy dokładność otrzymanych wyników i czas symulacji. Po upewnieniu się, że wyniki są identyczne, program analityczny posłużył do bardzo szybkich obliczeń potencjalnych zmian osiągnięć przy zmianie parametrów materiałowych jak również zależności geometrycznych uzwojenia lub żelaza części pierwotnej. W wypadku potwierdzenia pozytywnych zmian w osiągnięciach silnika, do dokładnej optymalizacji wykorzystano program Maxwell3D. W tym punkcie chciałbym nadmienić, że funkcja symulacji elektromagnetycznej w ruchu liniowym w dziedzinie czasu, utylizująca warunki krańcowe „Master Slave / Periodic”, w programie Maxwell3D została wprowadzona przy mojej współpracy z firmą ANSYS. Rezultatem badań są dwie publikacje w czasopiśmie naukowych [C10,B4]. Zgromadzony dodatkowy materiał oraz uzyskane wyniki dają podstawę do dalszych badań w dziedzinie napędów liniowych, w szczególności nad metodami uwzględniania nieliniowości materiałów magnetycznych w zależności od charakteru źródła zasilania. Praca na silnikami liniowymi doprowadziła do nowatorskiego opracowania metody kształtowania cewek krańcowych silnika w celu zmniejszenia efektu końcowego [PB5].

## **6. Charakterystyka prac naukowo badawczych przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora (1987-2001)**

Początki mojej pracy naukowej po uzyskaniu stopnia magistra miały miejsce na Wydziale Elektrycznym Politechniki Szczecińskiej, na którym rozpocząłem pracę na stanowisku asystenta. Moje zainteresowania badawcze związane były ściśle z kontynuacją zagadnienia opisanego w pracy magisterskiej, czyli metodami modulacji szerokości impulsów w falownikach trójfazowych. Praca uwieńczona została artykułem [C15], zaprezentowanym

na sympozjum w Wiśle, których byłem jednym z współautorów. Artykuł dotyczył sposobu komutacji mostka trójfazowego, tyrystorowego i generacji napięcia sinusoidalnego, poprzez odpowiedni rozkład impulsów o identycznym czasie trwania, przy spełnieniu warunku minimum zawartości harmonicznych. Innym tematem badawczym były obliczenia i konstrukcja falownika rezonansowego szeregowego do indukcyjnej obróbki metali.

W momencie formowania tematu pracy doktorskiej zmieniłem miejsce zamieszkania i podjąłem pracę w firmie Polytronics, a następnie kolejno CTS of Canada i Bombardier. W firmach tych zajmowałem się głównie projektowaniem i wykonaniem pojedynczych urządzeń energoelektronicznych na zamówienie z przemysłu. W firmie Polytronics moim głównym zadaniem było zaprojektowanie zasilacza awaryjnego UPS (Uninterrupted Power Supply) do militarnego transportera piechoty. Wynikiem mojej pracy w CTS of Canada Limited, jako jednego z trzech inżynierów projektantów, były następujące urządzenia:

- a) wielostopniowy trójfazowy zasilacz awaryjny (150 kVA) do zasilania kontroli reaktora dla Elektrowni Nuklearnej Bruce w Kanadzie,
- b) wielostopniowy przełącznik sieciowy do awaryjnego zasilania kontroli reaktora dla Elektrowni Nuklearnej Pickering w Kanadzie,
- c) projekt kontrolera źródła prądu stałego (2700 A) do akceleratora cząstek dla projektu TRIUMF,
- d) nabrzeżny zasilacz do ładowania baterii łodzi podwodnych (500 kW),
- e) zasilacz awaryjny złożony z dwóch równolegle połączonych 25 kVA inwerterów z wymuszonym podziałem prądu.

Wszystkie wyżej opisane systemy zostały zastosowane w praktyce. Dodatkowo, moim obowiązkiem było przeprowadzenie seminarium treningowego, dotyczącego obsługi wyżej wymienionych urządzeń.

Po przejściu do firmy Bombardier byłem odpowiedzialny za wykonanie i testy inwertera do zasilania indukcyjnego silnika liniowego do trakcji elektrycznej. To skłoniło mnie do większego zainteresowania narzędziami symulacyjnymi. Przy pomocy programu symulacyjnego SPICE udało mi się stworzyć modele przekształtników prądu oraz napięcia gwarantujące zastosowanie minimalnej liczby komponentów przy doskonałym odzwierciedleniu wszelkich zjawisk i stanów modelowanego urządzenia. Praca zaowocowała czterema artykułami dotyczącymi metod modelowania, przedstawionymi na konferencjach międzynarodowych - [C11-C14]. Po okresie około dwóch lat i po zapoznaniu się z właściwościami silnika liniowego, mój obszar zainteresowań przeniósł się w sferę metod sterowania silnikami asynchronicznymi, a głównie metod sterowania wektorowego. W tym czasie otworzyłem przewód doktorski dotyczący właśnie adaptacyjnego sterowania indukcyjnego silnika liniowego. Po okresie około trzech lat od rozpoczęcia przewodu doktorskiego uzyskałem stopień doktora nauk technicznych.

## **7. Zestawienie osiągnięć po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych**

Łącznie po obronie doktoratu otrzymałem 18 patentów i opublikowałem 26 prac naukowych (w tym 7 z listy MNiSW), z czego 7 w czasopismach z bazy JCR (0 w czasopismach polskich) i 19 w materiałach konferencji indeksowanych w WoS.

Według bazy Web of Science (Wrzesień 2017), na podstawie 24 prac łącznie zacytowanych 29 razy (w tym 16 bez autocytowań), h-indeks wynosi 4.

Według bazy SCOPUS (Wrzesień 2017), na podstawie 20 prac łącznie zacytowanych 38 razy, h-indeks wynosi 3.

Według Google Scholar (Wrzesień 2017), na podstawie 47 prac łącznie zacytowanych 104 razy, h-indeks wynosi 5:

(<https://scholar.google.com/citations?user=KkqVuLgAAAAJ&hl=en&num=20&oi=sra>).

Summary IF publikacji wynosi **16,375**.

