Załącznik nr 3

Autoreferat*

1) Imię i Nazwisko:

Jerzy Szczepanik

2) Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania.

Dyplom Magistra Inżyniera Elektryka: AKADEMIA GÓRNICZO HUTNICZA - Kraków, Wydział Elektrotechniki Automatyki i Elektroniki, specjalność: Budowa Maszyn i Urządzeń Elektrycznych, 1985 r., Praca dyplomowa pt.: *„Wyznaczanie typowych charakterystyk maszyny asynchronicznej przy wymuszeniu napięciowym na podstawie modelowania pola elektromagnetycznego"*, Promotor: dr inż. Andrzej Matras

Dyplom Master of Science in Electrical Engineering by research – Thesis: *"Reduction of Harmonic Distortions in Distribution Circuits Caused by Discharge Lamp Systems"* MONASH UNIVERSITY, Clayton Campus, Australia 1995 promotor prof. Władysław Mielczarski

Dyplom „Doctor of Philosophy in Electrical Engineering" ROYAL MELBOURNE INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Melbourne, Australia. PhD thesis title.: *„Evaluation of the Energy Loss of Electrical Drive During Dynamic Processes Using Neural Network Models"* 2000r praca realizowana pod opieką prof. Jerzego Cholewki
Nostryfikowany jako: **Stopień Doktora Nauk Technicznych** w dyscyplinie Elektrotechnika: AKADEMIA GÓRNICZO HUTNICZA 2002r

3) Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:

2002-(...) Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej (Adiunkt),

1996-2000 Royal Melbourne Institute of Technology, Melbourne, Australia (Asystent Stypendysta),

1994-96 Monash University, Clayton Campus, Australia, Pracownik Dydaktyczno-Techniczny)

1985-86 Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki - Wydział Transportu, Trakcja Elektryczna (Asystent Techniczny).

Zatrudnienie w ośrodku badawczym:

2000-2004 Zatrudnienie w „CHEMKOP LABEL", spółce córce Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Górnictwa Surowców Chemicznych "CHEMKOP" jako szef grupy rozwojowej

* przygotowany w oparciu o wzór Centralnej Komisji do Spraw Stopni i Tytułów

4) Wskazanie osiągnięcia 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. nr 65, poz. 595 ze zm.) w okresie po uzyskaniu stopnia doktora

a) tytuł osiągnięcia naukowego

Sterowanie rozpływem mocy w systemie elektroenergetycznym bazujące na bezpośredniej konwersji energii z użyciem przekształtnika macierzowego

b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa)

Podstawą o ubieganie się o nadanie stopnia dr hab. w dziedzinie elektrotechnika jest jako główne osiągnięcie naukowe monografia habilitacyjna w języku angielskim:

J. Szczepanik, „The Multiphase Matrix Converter for Power System Applications" Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Monografia nr 503, **ISSN 0860-097X**, Kraków 2015,

w której przedstawiłem nowe niepublikowane dotąd zagadnienia związane z kwestią rozpływu mocy w systemie elektroenergetycznym, a następnie zaproponowałem budowę przesuwnika fazowego opartego na przekształtniku macierzowym przeznaczonego do kontroli rozpływu mocy w systemie. Moim oryginalnym własnym wkładem w problematykę przedstawioną w monografii jest zaproponowanie koncepcji sterowania przekształtnikiem macierzowym oraz opracowanie modeli matematycznych i budowa fizycznych modeli laboratoryjnych przekształtnika jak i wielowęzłowego systemu elektroenergetycznego. Wyniki prac dotyczących prezentowanych w monografii zagadnień związanych z przedstawianym osiągnięciem naukowym zostały częściowo dokumentowane w postaci publikacji. W trakcie prowadzonych na przestrzeni kilku lat prac badawczych powstały prace, które częściowo uzupełniają i rozszerzają treści zawarte w monografii o kwestie mające charakter aplikacyjny. Poniżej przedstawiono najważniejsze z nich:

[1]. **Jerzy Szczepanik,** Tomasz Sieńko; *„Sterowany mikroprocesorowo przekształtnik macierzowy do aplikacji w systemach elektroenergetycznych"* Czasopismo Techniczne, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Z.13-E2/2015, pp.103-126

[2]. **Jerzy Szczepanik,** Bartosz Rozegnał; *„Struktura i analiza pracy pięciowęzłowego modelu systemu elektroenergetycznego"* Czasopismo Techniczne, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Z.13-E2/2015, pp.83-102

[3]. **Jerzy Szczepanik** *"Multiphase matrix converter for power system application"* International Symposium on Industrial Electronics ISTANBUL ISIE 2014 Stambuł 1 - 4 June 2014 publikacja w IEEE Explore

[4]. Tomasz Sieńko , **Jerzy Szczepanik**, Tadeusz Sobczyk *"Study of the application of multiphase matrix converter for interconnection of the high speed generation to the*

grid", KOMEL, Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr. 103, 3/2014, pp.281-286.

[5]. Tomasz Sieńko , **Jerzy Szczepanik**: *„The study of the implementation of multiphase matrix converter in power systems"* Przegląd Elektrotechniczny Nr. 8 pp.10-15, ISSN 0033-2097.

[6]. **Szczepanik, J.**; Sieńko, T.; *"New Control Strategy for Multiphase Matrix Converter"* 19th International Conference on Systems Engineering, ICSENG 2008, 9-21 Aug. 2008, pp. 121 – 126, Digital Object Identifier 10.1109/ICSEng.2008.44.

[7]. **Szczepanik, J.**; *"Multiphase Matrix converter for Power System Applications"* International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, ISCHIA (Italy), 11 - 13 June 2008, pp. 772-778, ISBN: 978-1-4244-1664-6.

[8]. **Szczepanik J.**, Sieńko T.: *"New control algorithm for multiphase matrix converter"* Proceedings of 16th International Conference on Systems Science 4-6 September 2007, Wrocław, vol. III, pp. 241-250, ISBN 978-83-7493-341-4.

[9]. **Szczepanik J.**, Sieńko T.: *"A new concept of application of multiphase matrix converter in power system"* Proceedings of the International Conference on "Computer as a Tool" Warsaw, Poland 9-12 September 2007, ISBN: 1-4244-0813-X, IEEE nr. 07EX1617C.

Ponadto prace nad określeniem własności przekształtnika stały się podstawą do zgłoszenia patentowego z 11.07.2014: Sieńko T.J., **Szczepanik J.**, Hudym V.,*" Sposób kompensacji mocy biernej, urządzenie do kompensacji mocy biernej"*, zgłoszenie patentowe nr P.408817, a prace nad następnym zgłoszeniem aktualnie trwają.

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

c.1. **Wprowadzenie uzasadniające cel naukowy prac i ewentualne ich wykorzystanie**

Tematyką modelowania przekształtników energoelektronicznych, ich zastosowaniem w sieciach elektroenergetycznych oraz ich wpływem na prądy tych sieci zacząłem się już interesować podczas przygotowywania dyplomu „Master of Science in Electrical Engineeging" który obroniłem w 1995 roku na uniwersytecie Monash w Melboutne w Australii. Prace były początkowo związane z zaburzeniami w sieci elektroenergetycznej wytwarzanymi przez przekształtniki oraz opracowaniem sposobu ich pomiaru i przygotowaniem odpowiednich filtrów. Wykonałem wtedy stanowisko do pomiaru i rejestracji wartości chwilowych kształtu napięcia i prądu oraz opracowałem koncepcję filtrów pozwalających na częściową kompensację zaburzeń tj. ograniczenie prądu w przewodzie neutralnym w instalacjach wysokich budynków wielokondygnacyjnych. Badania obejmowały optymalizację struktury filtrów tak aby przez przewód neutralny mogła płynąć pierwsza harmoniczna pochodząca z asymetrii obciążenia, a harmoniczne o kolejności zgodnej były blokowane.

Praca doktorska, którą obroniłem w roku 2000 na Royal Melbourne Institute of Technology dotyczyła modelowania przekształtników a w szczególności małych napędów (serwonapędy), które są głównym źródłem zakłóceń w sieciach niskiego napięcia nowoczesnych, zautomatyzowanych zakładów pracy. Ze względu na trudności w sformułowaniu modelu matematycznego dla obiektu dynamicznego o wielu zmiennych parametrach postanowiłem użyć modelu typu „Black Box" opartego o rekurencyjne struktury sieci neuronowej. Badania trwały także już po zakończeniu doktoratu a ich wynikiem było stworzenie pełnej procedury tworzenia i walidacji modelu neuronowego dla nieliniowego, dynamicznego układu elektromechanicznego. Wynikiem prac badawczych była monografia opublikowana przez Lambert Academic Publishing w 2011 roku.

Po rozpoczęciu pracy w 2002r. na Politechnice Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki zająłem się zastosowaniem energoelektroniki do sterowania parametrami energii oraz rozpływem mocy w systemie elektroenergetycznym. Badania dotyczyły urządzeń typu FACTS (Flexible AC Transmission Systems). Nieodłącznym elementami takich urządzeń są przekształtniki, lub układy przekształtników tworzące de facto układ przekształtnika AC-AC w konfiguracji AC-DC-AC. W trakcie opracowań związanych z badaniami pracy układów typu DC-link oraz ich możliwego zastosowania w stanach nieustalonych systemów elektroenergetycznych, zwróciłem uwagę na ich bardzo słabą dynamikę (wolny czas reakcji), co zaowocowało zwróceniem się w kierunku przekształtników o bezpośredniej konwersji AC-AC – przekształtników matrycowych (macierzowych). Przekształtniki takie umożliwiają bardzo szybką reakcję na zaburzenia w systemie elektroenergetycznym, gdy wymagana jest gwałtowna zmiana rozpływu mocy lub tłumienie oscylacji systemowych. W celu określenia własności urządzeń FACTS zawierających przekształtnik macierzowy należało najpierw przeprowadzić badania samego przekształtnika oraz możliwości jego kontroli, zbudować modele matematyczne przekształtnika, przeprowadzić symulacje pozwalające na ocenę jego właściwości a następnie zbudować model laboratoryjny i przeprowadzić testy na rzeczywistym obiekcie.

Zastosowanie przekształtnika w systemie elektroenergetycznym stawia jego systemowi kontroli zupełnie inne wymagania niż zastosowanie go w układach napędowych, gdzie wymagane są tylko sinusoidalne prądy. W związku z tym iż trójfazowe układy przekształtników nie mogły spełnić wymagań związanych z proponowaną aplikacją przekształtnika badania skierowano w kierunku struktur wielofazowych (6, 12 faz) oraz systemów kontroli pozwalających na pracę tych struktur w systemach elektroenergetycznych. Zwiększenie ilości faz wejściowych pozwala na złożenie napięć wyjściowych przekształtnika ze stosunkowo dużej ilości osiągalnych w danym momencie napięć wejściowych, co, podobnie jak w przekształtnikach wielopoziomowych, pozwala na uzyskanie kształtu napięć wyjściowych zbliżonego do sinusoidy.

Skonstruowałem szereg algorytmów pracy przekształtnika, opartych na „intuicyjnym" podejściu, a następnie wykorzystałem znaną już metodę obszarową do budowy rzeczywistego układu kontroli oraz opracowałem koncepcję generacji obszarów przewodzenia dla tej metody i dla rozpatrywanych algorytmów. Dla tak zdefiniowanego układu kontroli przekształtnika macierzowego, zbudowałem szereg modeli przekształtnika, gdzie obszary przewodzenia zaworów są parametrami tych modeli.

Podstawowy, opracowany przeze mnie od podstaw, model matematyczny był oparty na pełnym wykorzystaniu metody bilansu harmonicznych do analizy stanów ustalonych. Model ten bazuje na transformacji równań czasowych przekształtnika zapisanych w

formie zależności pomiędzy jego wejściem a wyjściem (napięcia i prądy) na równania przedstawiające zależności pomiędzy harmonicznymi dla poszczególnych składowych symetrycznych. Model którego wyprowadzenie było stosunkowo skomplikowane okazał się jednak mało użyteczny dla stanów dynamicznych, a jego zastosowanie było możliwe jedynie w przypadku symulacji operujących stanami quasi-stacjonarnymi wykorzystywanych do oceny zawartości harmonicznych w napięciach i prądach przekształtnika

Aby poznać szerzej własności poszczególnych, zaproponowanych systemów sterowania wykonałem własny model przekształtnika w programie Matlab Simulink. Model ten został zbudowany ze standardowych bloczków programu, ale jego sterowanie zostało napisane jako „S" funkcja, która może emulować pracę rzeczywistego procesora. Obiecujące wyniki symulacji pracy przekształtnika w systemie elektroenergetycznym oraz jego znakomita dynamika objawiająca się bardzo szybką odpowiedzią na zadane przesunięcie fazowe, dały impuls do budowy modelu laboratoryjnego. Rezultaty symulacji pozwoliły nie tylko na pokazanie wpływu przekształtnika na rozpływ mocy czynnej w systemie, ale także pokazały możliwości jego zastosowania do sterowania mocą bierną, co znalazło swoje odbicie w zgłoszonym wniosku patentowym.

Wielofazowy przekształtnik macierzowy może operować w systemie elektroenergetycznym jako przemiennik częstotliwości, przesuwnik fazowy, regulator przepływu mocy czynnej i biernej a także jako element w znanych strukturach układów FACTS. W ramach grantu ministerialnego przyznanego w formie dotacji do działalności statutowej, w latach 2007-2010 zbudowano pięciowęzłowy, czterogeneratorowy laboratoryjny model systemu elektroenergetycznego, którego byłem projektantem i głównym wykonawcą. System ten wykorzystywany jest do badań dynamiki układów elektroenergetycznych oraz do wpływu układów FACTS na rozpływy mocy i stabilność systemu. Zainstalowana moc generatorów w systemie to 56 kVA, skalowanie wartości elementów i prądów jest oparte na skalowaniu mocowym, a jego struktura układu jest strukturą wielokrotnie zamkniętą. W chwili obecnej zbudowano także przesuwnik fazowy o mocy szczytowej 30 kVA (ciągłej 20kVA) i rozpoczęto jego integrację z modelem systemu elektroenergetycznego.

c.2. **Omówienie metodycznych aspektów prac oraz osiągniętych wyników**

Sterowanie systemem elektroenergetycznym jest jednym z najważniejszych zagadnień elektroenergetyki, szczególnie w wypadku systemów z dużą zawartością niespokojnych i niesterowalnych źródeł energii takich jak na przykład źródła odnawialne. Problemy sterowania systemem mogą dotyczyć zarówno stanów ustalonych, gdzie mają one związek głównie ze sterowaniem rozpływu mocy, jak i stanów dynamicznych systemu, zwłaszcza stanów po-zaburzeniowych.

Generalnie z powodu braku możliwości gromadzenia energii elektrycznej, system elektroenergetyczny w stanie ustalonym pracuje przy równowadze popytu i podaży energii. Dotychczas podczas pracy systemu przepływy mocy były regulowane poprzez regulację pracy generatorów (moc czynna oraz bierna) oraz regulację napięć w węzłach osiąganą poprzez regulację zaczepów transformatorów. Ten system był wystarczający w czasie gdy większość energii była produkowana w blokach energetycznych sterowanych centralnie a struktura układu była stosunkowo prosta. Rozbudowa sieci w tym tworzenie kolejnych zamkniętych oczek i alternatywnych dróg przepływu energii skutkuje wzrostem ryzyka przepływów okrężnych zarówno wewnątrz systemu jak i poprzez połączenia międzysystemowe oraz, w wypadku wystąpienia zaburzeń, do

powstania lokalnych punktów niestabilności napięciowej. Brak pełnej sterowalności w systemie elektroenergetycznym może w skrajnych przypadkach doprowadzić do rozpadu systemu elektroenergetycznego – zjawiska typu „black out". Zjawiska te miały już miejsce w sieciach przesyłowych o bardziej rozbudowanej strukturze niż obecna polska sieć przesyłowa. Rozpad systemu elektroenergetycznego może nastąpić pomimo faktu, że sieć jest w danej konfiguracji teoretycznie stabilna, lecz w czasie zjawisk przejściowych po zaburzeniach stany (prądy i napięcia) opisujące dynamikę sieci wychodzą przez dostatecznie długi czas poza wartości dopuszczalne powodując lawinowe działanie zabezpieczeń i serię wyłączeń elementów tej sieci.

W związku z pogłębiającymi się problemami pracy oraz współpracy sieci europejskich a także wypadkami które miały miejsce w USA uświadomiono sobie potrzebę budowy urządzeń, które zapewnią kontrolę nad siecią przesyłową nie tylko w trakcie stabilnej pracy ale także będą w stanie zareagować w stanach po-zaburzeniowych. W pierwszej kolejności skonstruowano przesuwniki fazowe tak aby móc kontrolować rozpływ mocy czynnej w systemie.

Przeprowadzone w trakcie moich autorskich prac badawczych analizy zawierają podstawowe zależności otrzymane dla przesuwników fazowych z uwzględnieniem zmiany kąta przesunięcia napięć na terminalach transformatora spowodowanym zmianą jego obciążenia, oraz wprowadzają zmodyfikowany model gałęzi sieci zawierającej uproszczony model transformatora pozwalającego na zmianę wartości oraz kąta napięcia wejściowego linii. Na tej podstawie zostały wyprowadzone zależności na wpływ kąta przesunięcia i wartości napięcia na przepływ mocy czynnej i biernej daną linią. Szczególną uwagę poświęcono przypadkom (badania symulacyjne) gdzie dany obszar jest zasilany poprzez szereg linii o różnych napięciach z możliwością alternatywnego zasilania dla przypadku awarii jednej z linii oraz układom zasilania równoległego np. na poziomie 400 oraz 220 kV. W takich układach zasilania istnieje możliwość przeciążenia linii o niższych napięciach nie tylko w czasie po-zaburzeniowym ale nawet już w czasie normalnej pracy przy zwiększeniu obciążenia.

Podczas gdy w Europie przeprowadza się instalację przesuwników fazowych w większości opartych na zastosowaniu układu dwutransformatorowego, w USA i Azji rozpoczęto na masową skalę badania oraz zastosowanie urządzeń opartych na elementach energoelektronicznych zwanych urządzeniami typu FACTS (Flexible AC Transmission System). Konstrukcja tych urządzeń pozwala na kontrolę rozpływu mocy czynnej i biernej poprzez zastosowanie układów szeregowych wpływających na rozpływ mocy na wskutek wprowadzenia do systemu tzw. napięcia dodawczego czy kompensacji parametrów wzdłużnych linii, oraz układów równoległych których główną funkcją jest kontrola napięcia poprzez gospodarkę mocą bierną. Nierozłącznym elementem systemów FACTS są przekształtniki energoelektroniczne takie jak falowniki czy prostowniki dużych mocy.

Program badawczy prowadzony przeze mnie na Politechnice Krakowskiej zakładał zastosowanie przekształtnika matrycowego (macierzowego) do urządzeń typu FACS zamiast stosowanych powszechnie układów AC-DC-AC oraz zbudowanie bezpośredniego przesuwnika fazowego opartego na tym przekształtniku jako nowego typu urządzenia z rodziny FACTS.

Wprowadzenie nowego urządzenia do sieci elektroenergetycznej wymaga najpierw zapoznania się z warunkami jego pracy oraz z wymaganiami stawianymi poprzez pole aplikacji. W przypadku systemu elektroenergetycznego wymagania te dotyczą takich aspektów jak wpływ urządzenia na jakość przesyłanej energii (wahania napięcia, zawartość harmonicznych w prądach linii, zapady napięcia), wielkości mocy urządzenia czy warunki niego pracy. Na przykład zdecydowana większość aplikacji przekształtnika

macierzowego rozpatrywana jest dla układu napędowego gdzie głównym celem jest otrzymanie tylko sinusoidalnego prądu maszyny elektrycznej co dokonywane jest przy pomocy sterowania szerokością impulsu (PWM) przy założeniu pracy na dużą indukcyjność maszyny. W przypadku systemu elektroenergetycznego ważny jest nie tylko generowany przez przekształtnik kształt prądu, ale także kształt napięcia ze względu na dużo mniejsze indukcyjności układu przesyłowego a ponadto ważny jest też kąt przesunięcia prądu względem napięcia wprowadzany przez przekształtnik co wpływa na transfer mocy biernej w układzie przesyłowym. Ze względu na duże planowane moce przekształtnika w zastosowaniach systemowych nie używa się zazwyczaj sterowania typu PWM, ale przekształtników wielopulsowych lub wielopoziomowych. Warunki pracy przekształtnika muszą zakładać brak zwarć zarówno po stronie wejścia jak i wyjścia a dodatkowo ze względu na warunki pracy założyłem brak przerw bezprądowych w przebiegu prądów przekształtnika

Po dogłębnej analizie wymagań aplikacyjnych oraz przeglądzie dostępnych metod kontroli przekształtnika zdecydowałem się na zastosowania struktury wielofazowej oraz opracowanie nowych koncepcji kontroli. Koncepcje kontroli przekształtnika zostały oparte na założeniu iż przebiegi wyjściowe są tworzone bezpośrednio jako kombinacja aktualnie dostępnych przebiegów wejściowych w trakcie konwersji bezpośredniej. Dla tak założonego układu kontroli koronnym argumentem za zastosowaniem struktur wielofazowych (6x6, 12x12, 12x3) jest fakt iż dla tych struktur w danej chwili, podobnie jak w przypadku przekształtników wielopoziomowych, istnieje większa możliwość dopasowania jednego z przebiegów wejściowych do pożądanego przebiegu wyjściowego. W przypadku konwersji przebiegów sinusoidalnych na sinusoidalne (napięcia) rozpatrzono następujące podstawowe algorytmy kontroli:

A - „na najbliższą" – gdzie pożądane napięcie wyjściowe jest składane z fragmentów napięć wejściowych, które sa w danej chwili najbliżej napięcia wyjściowego

B - „z dwóch sąsiednich" – gdzie pożądane napięcie wyjściowe jest składane z fragmentów dwóch sąsiednich do tego pożądanego napięcia napięć wejściowych (dla konwersji 50/50 Hz)

C - „na przecinające się" – gdzie pożądane napięcie wyjściowe jest składane z fragmentów napięć wejściowych znajdujących się w sąsiedztwie ich przecięcia z pożądaną sinusoidą napięcia wyjściowego

Proponowane algorytmy zasymulowano używając analogowych komparatorów przy założeniu idealnej sinusoidy napięć wejściowych. W rzeczywistych rozwiązaniach niemożliwa jest jednak budowa analogowego układu kontroli, dlatego też do realizacji założonych algorytmów postanowiłem zaadoptować sterowanie obszarowe nad którym już poprzednio pracowałem. Sterowanie obszarowe oparte jest o koncepcję geometrycznej interpretacji wzajemnego położenia sinusoid wejściowych oraz wyjściowych rozpatrywanych z punktu widzenia zaworu przekształtnika. W miarę upływu czasu wartość fazy biegnącej (argumentu funkcji sinus napięcia wejściowego) narasta liniowo. Wzajemne położenie sinusoidy wejściowej i wyjściowej jest określane jako punkt trajektorii określonej na dwuwymiarowym obszarze, gdzie na osi OX odkładane są wartości argumentu sinusoidy wejściowej a na osi OY wartości argumentu sinusoidy wyjściowej. W szczególnym przypadku dla stałych częstotliwości trajektoria jest linią prostą a dla równych częstotliwości na wejściu i wyjściu jest linią prostą pochyloną pod kątem 45^0. Zawór przekształtnika znajduje się w pozycji przewodzącej jeżeli w danej chwili punkt trajektorii znajduje się wewnątrz obszaru określonego dla tego zaworu jako obszar przewodzenia. Można zauważyć że dla przebiegów okresowych o okresie „T" wystarczające jest rozpatrywanie obszaru o rozmiarze *TxT* a

trajektoria po dojściu do granicy obszaru zostaje odbita z powrotem do wartości argumentu „0" przy zachowaniu końcowej wartości osiągniętej dla „T".

Aby zastosować sterowanie obszarowe konieczne jest wygenerowanie obszarów przewodzenia dla proponowanych algorytmów kontroli, spełniających ponadto założenia wynikające z pola aplikacji i warunków pracy przekształtnika. Procedura generowania obszarów, którą napisałem w programie Matlab Simulink, umożliwia generowanie obszarów w postaci trójwymiarowej tablicy będącej zbiorem dwuwymiarowych tablic z których każda jest obszarem przewodzenia dla pojedynczego klucza.

Następnym etapem pracy było stworzenie komputerowych modeli przekształtnika macierzowego oraz modeli proponowanego przesuwnika fazowego opartego na tym przekształtniku. Modele te są niezbędne dla oszacowania zalet i wad proponowanych systemów kontroli przekształtnika oraz dla określenia zachowania urządzenia w systemie elektroenergetycznym. Modele przekształtnika muszą zawierać system sterowania, gdyż decyduje on o własnościach tego przekształtnika. Rozpatrywane były różne modele – od modeli bazujących na strukturach neuronowych (modele „black box") do rozbudowanych modeli matematycznych bazujących na metodach bilansu harmonicznych dla rozkładu przestrzennego sygnału. Modele typu „black box" zostały na samym początku odrzucone jako że w pierwszej fazie badań nie można było uzyskać wiarygodnych zestawów danych niezbędnych do nauczania oraz walidacji struktur neuronowych. Model matematyczny przekształtnika został oparty na równaniach więzów wprowadzanych przez przekształtnik pomiędzy jego wejściowymi prądami i napięciami a wielkościami wyjściowymi. Ponieważ, jak można zauważyć, stan danego zaworu przekształtnika zależy od wzajemnego położenia przebiegów napięć w fazach które ten zawór łączy oraz od położenia zaworu w matrycy przekształtnika zdecydowałem się na rozwiązanie tych równań w dziedzinie częstotliwości oraz położenia przestrzennego. Odpowiada to rozłożeniu obszarów przewodzenia dla kluczy przekształtnika na harmoniczne dwuwymiarowe (2-D Fourier transformation) a następnie na rozłożenie równań na składowe symetryczne. W wyniku przekształceń otrzymałem hiper-macierz, której elementami są macierze składowych symetrycznych dla poszczególnych harmonicznych. W przypadku macierzy będących więzami pomiędzy odpowiednio wielkościami wejściowymi bądź wyjściowymi, macierze te po transformacji są macierzami diagonalnymi, a zatem cała zależność wynikająca ze sterowania przekształtnika tkwi w macierzach ukazujących zależności wejście-wyjście. Szczegółowa analiza i rozwiązanie układów równań z zastosowaniem metody bilansu harmonicznych umożliwiły jakościową (określenie pulsacji) oraz ilościową (wyznaczenie amplitud) ocenę widma Fouriera napięć i prądów przekształtnika. Model mimo że pozwala na łatwą analizę ilościową zawartości harmonicznych, jest niestety niewydolny numerycznie. W stanach dynamicznych należy bowiem rozwiązywać układy równań różniczkowych o zespolonych współczynnikach. Proponowane podejście do matematycznego modelowania przekształtnika pokazuje również jasno zależność modelu od systemu sterowania, gdyż dla każdego z proponowanych sterowań obszary przewodzenia mają inny kształt, co niewątpliwie spowoduje różne rozkłady na harmoniczne, nawet dla tej samej częstotliwości próbkowania.

W związku z niską funkcjonalnością modelu matematycznego postanowiono zbudować model przy użyciu programu Matlab Simulik. Sam „hardware" przekształtnika to jest matryce 12x12 i 6x6 dwukierunkowych zaworów, zasilania, obciążenia itp. został zaprojektowany przy pomocy dostępnych w programie bloków. Natomiast system kontroli postanowiono zbudować w postaci matlabowskiej „S" funkcji, zbudowanej tak aby móc emulować zachowanie układu z mikroprocesorowym

sterownikiem. Funkcja przeszukuje zbiór obszarów przewodzenia próbkowanych z dokładnością do jednego stopnia (struktura 360x360x36 dla przekształtnika 6x6 i struktura 360x360x144 dla przekształtnika 12x12) i w każdym kroku symulacji dostarcza wektor sterowań (36 lub 144 elementowy do „hardware" przekształtnika. Na podstawie tego modelu badano właściwości przekształtnika poddanego różnym algorytmom kontroli.

Na początku rozpatrywano sterowania operujące tylko zmianą kąta napięcia wyjściowego względem wejściowego bez zmiany częstotliwości. Dla sterowania „na przecinające się" (sterowanie jednookresowe) stwierdzono że przekształtnik zmienia znak mocy biernej przy porównaniu pierwszych harmonicznych wielkości wejściowych i wyjściowych, zawartość harmonicznych oraz transfer napięcia są stałe, a przesunięcie fazowe napięcia wyjściowego jest proporcjonalne do podanego sterowania.

W przypadku sterowania „z dwóch najbliższych", wejściowa moc bierna oraz jej charakter pozostawała taka sama jak po stronie wejścia, a transfer napięcia oraz zawartość harmonicznych były zależne od kąta wysterowania, jakkolwiek rzędy generowanych harmonicznych były stałe. Przesuwnik przy przesunięciach $0 \pm k \cdot 2\pi/N$, gdzie N – wielkość matrycy przekształtnika a k - liczba całkowita, nie wprowadzał żadnych zaburzeń do systemu poza spadkiem napięcia na zaworach.

Sterowanie „na najbliższą" można rozpatrywać jako pewien wybór pomiędzy poprzednimi rozwiązaniami, co skutkuje dużymi zniekształceniami prądów wejściowych, ale daje możliwość sterowania wielkością przesunięcia fazowego napięcia i prądu wejściowego w funkcji przesunięcia fazowego. Zaobserwowano że przesunięcie to waha się od $-\varphi$ do $+\varphi$, a co za tym idzie dla pewnych przesunięć wynosi „0". Stwarza to możliwości kontroli znaku mocy biernej płynącej przez linię i stało się przedmiotem zgłoszenia patentowego. W przypadku sterowania „na najbliższą" zaobserwowano podobne zależności jak dla sterowania „z dwóch najbliższych", co oznacza zależny od przesunięcia transfer napięcia i zawartość harmonicznych oraz nieliniowe zależności dla sterowania (zależność pomiędzy żądanym przesunięciem wprowadzonym do sterowania a rzeczywistym przesunięciem pierwszych harmonicznych napięć wyjściowych względem pierwszych harmonicznych napięć wejściowych).

Wyniki otrzymane z symulacji były bardzo obiecujące, dlatego też postanowiono wykonać wielofazowy (6x6) model laboratoryjny przekształtnika. Układ sterowania wykonano jako mikroprocesorowy sterownik zdolny do generacji 144 elementowego wektora stanów zaworów przekształtnika, a więc zdolny do sterowania 144 elementowej matrycy. Rozmiar 12x12 uznano za maksymalną wielkość ze względów ekonomicznych. Cała trudność budowy kontrolera polegała na odpowiednim zorganizowaniu pamięci tak aby po zsynchronizowaniu z napięciem wejściowym można było, po dodaniu żądanego przesunięcia fazowego, wygenerować pewien punkt na trajektorii (ekwiwalent adresu) dla którego zostaną określone 144 stany. Dla częstotliwości 50 Hz oraz częstotliwości próbkowania (częstotliwości zmian stanów) równej 360 na okres, częstotliwość zmian stanów na wyjściu wynosi 18kHz. W trakcie badań laboratoryjnych okazało się, że po zwiększeniu rozmiaru pamięci kontrolera jest możliwe co najmniej dwukrotne zwiększenie częstotliwości próbkowania. Budowa modelu laboratoryjnego pozwoliła na określenie nowej grupy problemów związanych z budową przekształtnika, a mianowicie problemów komutacyjnych czy problemów synchronizacyjnych oraz na porównanie przebiegów napięć i prądów otrzymanych z rzeczywistego układu oraz z symulacji przeprowadzonych na zbudowanych modelach. Szczególnie trudny do rozwiązania jest problem komutacji – przekształtnik w laboratorium pracuje ze źródła napięciowego (układ kondensatorów) na obciążenie

o charakterze indukcyjnym bądź rezystancyjnym. W związku z tym przy jednoczesnej komutacji dwóch zaworów może nastąpić zwarcie kondensatorów wejściowych oraz impuls prądu wejściowego. Zastosowano szereg koncepcji ograniczenia tego zjawiska takich jak opóźnienia komutacji, „wyzerowanie" stanu wszystkich łączników przed ponownym załączeniem czy dodatkowe włączone szeregowo na wejściu małe indukcyjności, co oczywiście powodowało powstanie przepięć w związku z przerywaniem prądu w indukcyjnościach.

W związku z tym że badania przeprowadzone na laboratoryjnym modelu przekształtnika dały pomyślne rezultaty, zgodne z wynikami otrzymanymi w trakcie symulacji, postanowiono zbudować model przesuwnika fazowego bazującego na przekształtniku i zaaplikować go do laboratoryjnego modelu wielowęzłowego systemu elektroenergetycznego. System taki, o pięciowęzłowej strukturze oraz układzie zamkniętym, wykonano na podstawie mojego autorskiego projektu i przy moim bezpośrednim udziale. Obecnie trwają prace nad budową modelu przekształtnika o odpowiedniej mocy (50 kVA) oraz badania nad zastosowaniem odpowiednich filtrów, takich aby ich zastosowanie nie wpływało ujemnie na pracę urządzenia.

c.3. **Podsumowanie**

Przedstawiona monografia dotyczy koncepcji budowy nowego typu urządzenia FACTS w celu kontroli rozpływu mocy jak i w celu kontroli zjawisk dynamicznych zachodzących w sieciach elektroenergetycznych. Narzucone warunki pracy urządzenia spowodowały konieczność zastosowania przekształtnika o konwersji bezpośredniej – przekształtnika macierzowego. Budowa urządzenia oraz wymagania aplikacji narzucały zupełnie nowe podejście do systemu jego sterowania. Na początku zbudowano analogowy model bazujący na komparatorach a następnie przetestowano trzy podstawowe koncepcje sterowania, które z sinusoidalnych przebiegów wejściowych mogą zbudować bliskie sinusoid przebiegi napięć wyjściowych, to jest złożyć napięcia wyjściowe z fragmentów napięć wejściowych. Opracowano zatem koncepcję sterowania opartą na sterowaniu obszarowym oraz podano warunki generacji obszarów sterujących dla tej koncepcji. Obszary te musiały być tak dobrane aby nie powodować zwarć na wejściu lub wyjściu przekształtnika, zapewnić brak okresów bezprądowych oraz powodować jak najmniejsze odkształcenie napięć.

Symulacje pozwalające ocenić warunki pracy przekształtnika przeprowadzono używając standardowego oprogramowania Matlab oraz dwóch modeli: modelu bazującego na bilansie harmonicznych oraz modelu zbudowanego z elementów dostępnych w bibliotece programu Matlab Simulink. Symulacja modelu bazującego na bilansie harmonicznych polega na rozwiązywaniu równań więzów przekształtnika w dziedzinie częstotliwości i składowych przestrzennych ze względu na wartości napięć i prądów na terminalach przekształtnika. W przypadku wprowadzenia zewnętrznych elementów rezystancyjnych do obwodu przekształtnika wyniki symulacji były akceptowalne, ale już wprowadzenie indukcyjności powodowało niewydolność numeryczną modelu.

W związku z tym zbudowano drugi model oparty o biblioteki programu Simulink, który pozwolił ocenić właściwości pracy przekształtnika. W trakcie testów modelu pokonano wiele problemów związanych z doborem warunków początkowych, doborem procedury rozwiązywania równań modelu (solvera) czy stabilnością rozwiązania tych równań, tak aby uzyskać rezultaty zbliżone do rezultatów otrzymanych z modelu analogowego.

Eksperymentalny rzeczywisty model małej mocy (2kVA) bazujący na 6x6 matrycy dwukierunkowych łączników został zbudowany w laboratorium w celu weryfikacji rezultatów symulacji oraz testów zmierzających do budowy większego urządzenia. System kontroli zbudowano na bazie szybkiego mikrokontrolera realizującego proste przeszukiwanie pamięci zgodnie z synchronizacją i zadaną trajektorią (aktualne wartości faz biegnących sinusoidalnych przebiegów napięć na wejściu i wyjściu). Kontroler wyposażono także w układ komunikacji poprzez port USB co pozwala na wpisanie do pamięci mapy obszarów przewodzenia oraz kontrolę synchronizacji czy kąta nachylenia i przesunięcia trajektorii.

Przy analizie wyników eksperymentów i symulacji brano pod uwagę takie parametry jak: THD (Total Harmonic Distortion), transfer napięcia, funkcję kontroli, przepływ mocy czynnej i biernej poprzez konwerter, obciążenie łącznika oraz proces komutacji. Przy konwersji 50 Hz na 50Hz (przekształtnik jako przesuwnik fazowy) dla jednej z proponowanych koncepcji sterowania („z przecinających się") THD pozostaje stałe a dla pozostałych sterowań („z najbliższej" i „z dwóch najbliższych") jest zależne od kąta przesunięcia pomiędzy wejściowym a wyjściowym napięciem konwertera. Ta zmiana THD dotyczy tylko amplitud poszczególnych harmonicznych, a ich rząd pozostaje cały czas taki sam, co pozwala na łatwą budowę filtrów.

Należy tutaj dodać że badanie parametrów przekształtnika dokonywano zarówno na podstawie symulacji jak i na podstawie danych zebranych ze zbudowanego modelu przekształtnika o strukturze 6x6. Dane zebrane z rzeczywistego laboratoryjnego modelu wykazywały dużą zbieżność z danymi otrzymanymi z symulacji w zakresie niższych rzędów harmonicznych to jest do 40 harmonicznej (błędy niższe niż 10%, rzędy harmonicznych takie same), a kształty przebiegów wejściowych i wyjściowych wykazywały bardzo duże podobieństwo. W rzeczywistych przebiegach, przy pracy ze źródła napięciowego (bateria kondensatorów) na obciążenie indukcyjne w napięciach wyjściowych widoczne są przepięcia, a w prądach wejściowych przetężenia, co rzutuje to na zawartość harmonicznych wyższych rzędów w otrzymanych przebiegach.

Transfer napięcia jest stały dla sterowania typu „z przecinających się" a zmienny dla pozostałych sterowań („z najbliższej" i „z dwóch najbliższych"). Co ciekawe dla przesunięć $0+k\bullet(360/N)$ osiąga on maksimum równe „*1*" a dla przesunięć $360/2N+k\bullet(360/N)$ minimum *(N-rozmiar matrycy przekształtnika, k- liczba całkowita).*

Funkcja kontroli (rzeczywiste przesunięcie pomiędzy pierwszymi harmonicznymi napięć na wejściu i na wyjściu w funkcji przesunięcia trajektorii) jest funkcją liniową w przypadku kontroli typu „z przecinających się" oraz „z dwóch najbliższych" a nieliniowa w przypadku kontroli „z najbliższej".

Właściwości te badano zarówno używając symulacji jak i analizując przebiegi otrzymane z rzeczywistego modelu.

Jedną z najciekawszych własności przekształtnika jest jego wpływ na transfer mocy biernej. Sterowanie „z dwóch najbliższych" nie zmienia znaku oraz wartości mocy biernej po obydwóch stronach (wartość mocy biernej była mierzona dla pierwszych harmonicznych przebiegów), sterowanie „z przecinających się" powoduje zmianę znaku mocy biernej, co oznacza że jeśli na wyjściu moc bierna ma charakter indukcyjny to na wejściu ma charakter pojemnościowy. Dla sterowania „z najbliższej" przesył mocy biernej zależy od kąta przesunięcia i tak dla przesunięć $0+k\bullet(360/N)$ sytuacja jest identyczna jak dla sterowania „z dwóch najbliższych" a dla $360/2N+k\bullet(360/N)$ sytuacja jest identyczna jak dla sterowania „z przecinających się", co oznacza że w każdym interwale $(0+k\bullet(360/N),\ 0+(k+1)\bullet(360/N))$ muszą istnieć dwa punkty przy których na wejściu osiągniemy zerowe przesunięcie pomiędzy pierwszą harmoniczną napięcia

i prądu (unity power factor). Pozwala to na konstrukcję nowych urządzeń do kontroli rozpływu mocy biernej i stało się tematem patentu.

Przedstawione prace nie wyczerpują obszernego zagadnienia modelowania pracy przekształtników w systemie elektroenergetycznym, ale dają pogląd na stopień skomplikowania problemu. W rozległych wielowęzłowych systemach elektroenergetycznych ważnym czynnikiem jest prostota modelu, aby mógł on być zastosowany w symulacjach stanów dynamicznych. Przedstawiony w pracy model bazujący na bilansie rozkładów harmonicznych i składowych przestrzennych jest zbyt skomplikowany do tego typu symulacji, ale może być pomocny w ocenie ilościowej (zawartość harmonicznych, transfer napięcia) przy ocenie wpływu pracy przekształtnika na system. Model ten może zostać zastąpiony modelem typu „black box", który dla przekształtnika macierzowego pracującego w stanie ustalonym powinien być relatywnie prosty, gdyż przekształtnik nie zawiera elementów inercyjnych (elementów gromadzących energię). Budowa takiego modelu jest jednak możliwa tylko dla jednego typu sterowania na podstawie danych z rzeczywistego obiektu.

Za najważniejsze osiągnięcia poznawcze oraz najbardziej istotne rezultaty prac uważam:

- Analizę literatury dotyczącej zagadnień modelowania rozpływu mocy w systemie oraz modelowania elementów systemu
- Analityczny opis rozpływu mocy dla wprowadzonej koncepcji uniwersalnej gałęzi systemu elektroenergetycznego pozwalającej na opis stanu systemu przy pomocy wartości napięć na szynach rozdzielni (wartości i fazy)
- Propozycję wprowadzenia do systemu elektroenergetycznego przekształtnika o bezpośredniej konwersji energii charakteryzującego się bardzo dobrą dynamiką (bardzo szybkim czasem odpowiedzi)
- Opracowanie koncepcji podstawowych typów sterowań dla wielofazowej struktury przekształtnika bez użycia sterowania PWM,
- Zapis równań wynikających z więzów wprowadzanych przez przekształtnik przy pomocy wielkości wejściowych oraz wyjściowych przekształtnika,
- Wprowadzenie sterowania obszarowego oraz budowa algorytmu generacji obszarów dla dowolnych typów sterowań
- Opracowanie modelu matematycznego bazującego na bilansie składowych przestrzennych harmonicznych,
- Opracowanie alternatywnego modelu przy użyciu programu Matlab, gdzie układ sterowania został zbudowany w postaci funkcji emulującej działanie procesora,
- Analizę pracy przekształtnika dla różnego typu obciążeń oraz różnych sterowań w stanach ustalonych oraz stanach dynamicznych
- Budowę rzeczywistego układu kontroli oraz układu łączników matrycy przekształtnika,
- Porównanie pracy modelu laboratoryjnego z modelami komputerowymi oraz analiza wpływu typu sterowania na przepływ mocy poprzez przekształtnik,
- Uzyskanie zbieżności obliczeń analitycznych oraz przebiegów otrzymanych z symulacji z wynikami pomiarów.
- Pokazanie wpływu przekształtnika na przepływ mocy biernej oraz przygotowanie zgłoszenia patentowego dotyczącego tego problemu.

5) Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych (okres po uzyskaniu stopnia naukowego doktora)

Główne obszary moich pozostałych zainteresowań naukowych, są związane z realizacją projektów badawczych i zleceń zewnętrznych i obejmują cztery podstawowe kierunki:

1. **Budowa układów pomiarowo-kontrolnych,**
2. **Praca nad modelowaniem układów dynamicznych przy pomocy struktur neuronowych**
3. **Modelowanie nietypowych konstrukcji małych elektrowni wodnych,**
4. **Badanie układów stabilizacji napięcia przy pomocy układów FACTS**

Ad/ 1.

Pomiary i kontrola wieloparametrowa są jednym z podstawowych zadań w przemyśle. Podczas pracy w spółce „Chemkop Label" (lata 2000-2003) konstruowałem układy pomiarowe oraz wielokanałowe układy akwizycji danych dla przebiegów wolnozmiennych. Konstrukcje urządzeń obejmowały między innymi układy do pomiaru energii oraz ilości pary i zostały

zamontowane w kilku zakładach przemysłowych i kopalniach. Praca badawcza polegała na opracowaniu zależności uwzględniającej ilość energii przenoszonej przez parę wodną w funkcji spadku ciśnienia pary na kryzie, temperatury pary oraz jej bezwzględnego ciśnienia. Pomiary uwzględniały zatem charakterystyki związane ze stopniem nasycenia pary zarówno na dolocie jak i na powrocie z wymiennika. Spółka posiadała także stary system pomiarowy, który został zmodyfikowany i zamontowany między innymi w elektrowni Połaniec. System bazujący na 16 bitowych mikroprocesorach pozwalał na pomiary do 100 wielkości wolnozmiennych (temperatury, ciśnienia) i służył do nadzoru temperatur oleju oraz łożysk turbin. Sterował także układami zewnętrznego chłodzenia transformatorów. Dodatkowym projektem był unikalny system badania szczelności cementowania rur wpustowych kawern posolnych wykonany dla kopani soli „Góra" i mający dać odpowiedź czy kawerny te są wystarczająco szczelne aby użyć je jako strategiczne podziemne zbiorniki paliw.

Ad/.2.

1. Tematyka ta była bezpośrednią kontynuacją prac prowadzonych w trakcie doktoratu, a jej rozwinięcie polegało na badaniu zbieżności odpowiedzi modeli o różnych strukturach rekurencyjnych przy starcie symulacji. Problem zbieżności odpowiedzi modelu wynika z faktu że model neuronowy nie posiada członów inercyjnych (gromadzących energię) i w chwili początkowej jego odpowiedź może znacznie różnić się od wyników otrzymanych z rzeczywistego obiektu. W celu poprawnego odwzorowania obiektu tworzy się struktury rekurencyjne, bądź wprowadza człony inercyjne w sprzężeniach zwrotnych we wnętrzu sieci neuronowych. Dodatkowe badania obejmowały również udoskonalenia w procedurze walidacji modeli oraz w algorytmach generycznych służących do optymalizacji struktury sieci neuronowych. Wyniki tych prac zostały zawarte w monografii ." *Neural Network Model of Electrical Drive"* wydanej przez Lambert Academic Publishing w 2011 roku.

Ad./3.

Problematyka badań układów generacyjnych pracujących przy zmiennej prędkości obrotowej w nietypowych warunkach wynikła ze współpracy z małymi przedsiębiorstwami poszukującymi nowych, efektywnych cenowo rozwiązań. Badania zaowocowały nowatorskimi rozwiązaniami które znalazły swój finał w zgłoszeniu patentowym i otrzymaniu patentu związanego z konstrukcja elektrowni nurtowej - Patent Numer: PL406358-A1

Współpraca z nowosądecką firmą Antares SL zaowocowała nowymi rozwiązaniami mikro-elektrowni pływających o zmiennej prędkości obrotowej. W celu budowy prototypu elektrowni złożyłem wniosek o grant NCBiR, który jednak nie został przyznany. Przedsiębiorcy, po podliczeniu kosztów, chcą jednak kontynuować projekt, który jest obecnie w fazie projektu technicznego oraz w fazie zdobywania pozwoleń wodnoprawnych dla wybranej lokalizacji.

Ad./4

Jednym z podstawowych zastosowań urządzeń FACTS w systemie elektroenergetycznym jest możliwość stabilizacji napięć w węzłach sieci poprzez gospodarkę mocą bierną. Ponieważ zajmowałem się przekształtnikami energoelektronicznymi, głównym punktem zainteresowania były węzły sieci do której podłączone są prostowniki dużych mocy a obciążenie ma charakter zmienny bądź niespokojny. W Polsce problemy znacznych spadków napięć dotykają głównie układów zasilania kolei, gdzie w niektórych stacjach prostowniki zasilane są z systemu elektroenergetycznego na poziomie 15 kV. W trakcie

najazdu pociągów znaczne obciążenie układu zasilania powoduje nie tylko spadek napięcia na sieci trakcyjnej DC ale także na linii zasilającej stację. Po przeprowadzonych badaniach zaproponowałem zastosowanie układów STATCOM umocowanych na wejściu stacji przekształtnikowej do stabilizacji napięcia poprzez gospodarkę mocą bierną. Dodatkową zaletą zaproponowanego układu jest jego brak podatności na rezonanse z harmonicznymi prądów obciążenia i napięć sieci. Następnie podjąłem współpracę z ukraińskim profesorem wykładającym na Politechnice Krakowskiej i badania objęły układy zasilania pieców łukowych. Do układów wprowadzono system filtrów oraz układ STATCOM, których zadaniem jest redukcja zawartości harmonicznych oraz kompensacja mocy biernej generowanej poprzez prostowniki pieca. Efektem prac jest patent №100782 „Układ zasilania pieca lukowego prądu trzyfazowego" Hudym V., Sobczyk T., Szczepanik J. przyznany na Ukrainie w 2013 roku

Podsumowanie informacji nt. dorobku (szczegółowe informacje dotyczące mojego dorobku naukowego i dydaktycznego, wg punktów zamieszczonych we wzorze Centralnej Komisji do Spraw Stopni i Tytułów, zawiera załącznik nr 5):

Zestawiając moje dane z całego okresie pracy naukowej wynika, że jestem autorem dwóch monografii indywidualnych, autorem lub współautorem 38 (11 przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora) publikacji zamieszczonych w czasopismach i materiałach konferencyjnych (krajowych i międzynarodowych), 6 niepublikowanych prac naukowych oraz opracowań dla jednostek zewnętrznych oraz patentów – dwóch przyznanych oraz zgłoszenia patentowego.

Wygłosiłem 11 (4 przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora) referatów na krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych.

Uczestniczyłem w krajowych ministerialnych projektach badawczych (1 raz jako główny wykonawca, 1 raz jako wykonawca), a także w dwóch projektach zagranicznych.

Baza Web of Sciense wykazuje 11 publikacji, cytowanych 19 razy (12 razy bez autocytowań) oraz współczynnik Hirscha h-index = 3. Sumaryczny impact factor, według listy Journal Citation Reports (JCR) zgodnie z rokiem opublikowania JCR, wynosi IF = 4,654.