

Autoreferat

1. IMIĘ I NAZWISKO

Tomasz Binkowski

2. UZYSKANE STOPNIE NAUKOWE I TYTUŁY ZAWODOWE

Magister inżynier (1996 r.) – Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektryczny. Dyplom z wyróżnieniem.

Doktor nauk technicznych (16.06.2004 r.) – nadany przez Radę Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej.

Tytuł rozprawy: *Badanie przekształtnika matrycowego dla wybranych metod sterowania*

Promotor: dr hab. inż. Kazimierz Buczek, prof. PRz

Recenzenci: prof. dr inż. Henryk Tunia

prof. dr hab. inż. Stanisław Piróg

3. PRZEBIEG ZATRUDNIENIA W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH

Od 1.10.1996 r. do 31.07.2004 r.:

asystent – Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki

Od 1.08.2004 r.:

adiunkt – Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki

4. OMÓWIENIE OSIĄGNIĘĆ, O KTÓRYCH MOWA W ART. 219 UST. 1 PKT. 2 USTAWY

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Osiągnięcie naukowe uzyskane po uzyskaniu stopnia doktora stanowią dwa patenty oraz cykl publikacji powiązanych tematycznie, pod wspólnym tytułem:

Strategie sterowania napędami wysokoobrotowymi i przekształtnikami energii ze źródeł odnawialnych współpracującymi z pokładowymi systemami zasilającymi o podwyższonej częstotliwości.

4.2. Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe

Lista publikacji obejmuje dziesięć pozycji, w tym dwa patenty, pięć artykułów w czasopiśmie oraz trzy rozdziały w monografiach. Prace przedstawiono w kolejności chronologicznej. Wartość współczynnika Impact Factor (IF) oraz liczbę punktów MEiN podano zgodnie z rokiem wydania danej publikacji. Deklaracje udziału współautorów w pracach niesamodzielnych zamieszczono w załączniku nr 4.

- [1] **Binkowski T.**, *Sposób podłączenia do źródła napięcia silnika indukcyjnego wirującego z nieznaną prędkością*, (2013), Patent udzielony przez Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, **25** pkt.

- [2] **Binkowski T.**, *Universal high speed induction motor driver*, (2015), Springer International Publishing, Switzerland, t.324, s.149-162, ISBN: 978-3-319-11248-0, doi:10.1007/978-3-319-11248-0_12, rozdział w monografii, **15** pkt.

- [3] **Binkowski T.**, *Sposób sterowania i układ sterujący trójfazowego trójgałęziowego falownika napięcia*, (2018), Patent udzielony przez Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, **75** pkt.

- [4] **Binkowski, T.**, *Fuzzy logic grid synchronization technique for single-phase systems*, (2018), PAEE, Publisher: IEEE- Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York (USA), s. 1-5, ISBN/ISSN: 978-1-5386-6091-1, doi: 10.1109/PAEE.2018.8441120, rozdział w monografii, **15** pkt.

- [5] **Binkowski, T.**, *Photovoltaic inverter control using programmable logic device*, (2019), SN Applied Sciences, 1(6) doi:10.1007/s42452-019-0598-x, artykuł w czasopiśmie, IF=**0**, **20** pkt.

- [6] **Binkowski, T.**, *A conductance-based MPPT method with reduced impact of the voltage ripple for one-phase solar powered vehicle or aircraft systems*, (2020), *Energies*, 13(6) doi:10.3390/en13061496, artykuł w czasopiśmie, IF=**3,004**, **140** pkt.

- [7] **Binkowski, T.**, *Synchronization of the photovoltaic converter with on-board high frequency grid*, (2021), Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics, doi:10.1109/WZEE54157.2021.9577012, rozdział w monografii, **20** pkt.
- [8] Nowak, M., **Binkowski, T.**, Piróg, S., *Proportional–resonant controller structure with finite gain for three-phase grid-tied converters*, (2021), Energies, 14 (20), doi:10.3390/en14206726, artykuł w czasopiśmie, IF=**3,004**, **140** pkt.
- [9] **Binkowski, T.**, *Fuzzy logic based synchronization method for solar powered high frequency on-board grid*, (2021), Energies, 14(24) doi:10.3390/en14248194, artykuł w czasopiśmie, IF=**3,004**, **140** pkt.
- [10] **Binkowski T.**, Nowak M., Piróg S., *Power Supply and Reactive Power Compensation of a Single-Phase Higher Frequency On-Board Grid with Photovoltaic Inverter*, (2022), Energies, 2022, 15(7), 10.3390/en15072563, artykuł w czasopiśmie, IF=**3,004**, **140** pkt.

Sumaryczny współczynnik IF przedstawionych prac to **12,016**. Suma punktów MEiN przedstawionych w punkcie 4.2 prac będących osiągnięciem naukowym to **730**, w tym **590** stanowi mój udział.

4.3. Omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

4.3.1. Omówienie tematyki badawczej i celu naukowego

Pokładowe, elektryczne systemy zasilające pełnią bardzo ważną rolę w procesie dystrybucji energii w obiektach latających, pływających, a także w pojazdach kosmicznych. Specyfika funkcjonowania tych obiektów, a w szczególności zarządzanie zużyciem i produkcją energii elektrycznej w odizolowanym systemie elektroenergetycznym, sprawiają, że stosowane rozwiązania technologiczne muszą charakteryzować się bardzo dużą sprawnością energetyczną i zminimalizowanym wpływem na całkowity bilans energii niezależnej platformy mobilnej. Jednym z istotnych czynników, ograniczającym zapotrzebowanie na energię obiektu, jest minimalizacja masy wykorzystywanych urządzeń, często powiązana z ograniczeniem ich gabarytów. W przypadku urządzeń elektrycznych, parametrem elektrycznym o bardzo dużym wpływie na gabaryty części elektromechanicznej urządzeń jest częstotliwość napięcia

zasilającego. Gabaryty odbiornika energii, a tym samym jego masa, maleją wraz ze wzrostem częstotliwości napięć zasilających, przy czym, w przypadku silników elektrycznych, implikuje to zwiększenie stosunku długości wirnika do jego średnicy. Z kolei większy stosunek długości do średnicy wirnika sprawia, że urządzenia takie są bardziej podatne na powstawanie zjawiska rezonansu elektromechanicznego. W konsekwencji, pokładowe sieci elektryczne projektuje się tak, aby częstotliwości napięć były większe niż w przypadku naziemnych sieci elektroenergetycznych, a odbiorniki mogły być zasilane bezpośrednio z tych sieci. Energia, jaka może być dystrybuowana w sieci pokładowej, pochodzi przede wszystkim z generatorów wykorzystujących paliwa pierwotne lub magazynów elektrochemicznych energii. Jej ilość jest ograniczana w zależności od możliwości i charakterystyki danego obiektu. Zmniejszenie zapotrzebowania na energię pierwotną jest możliwe poprzez zastosowanie źródeł energii odnawialnej. W przypadku statków, platform latających i pojazdów kosmicznych coraz częściej sięga się po energię promieniowania słonecznego, która przekształcona do formy energii elektrycznej może być wprowadzona do pokładowej sieci elektrycznej. W związku z podwyższoną wartością częstotliwości napięć sieci pokładowej, można intuicyjnie stwierdzić, że znane i zbadane metody sterowania układami przekształtnikowymi podłączonymi do tej sieci można stosować, ale pod warunkiem weryfikacji współzależności czasowych wykonywanych procesów. Inną ścieżką postępowania, powodującą zmniejszenie zapotrzebowania na energię, jest opracowanie nowych lub modernizacja znanych technik sterowania.

Moim osiągnięciem naukowym są skutecznie przeprowadzone badania obejmujące zagadnienia różnych, autorskich strategii sterowania napędów wysokoobrotowych i przekształtników fotowoltaicznych współpracujących z sieciami pokładowymi o podwyższonej częstotliwości. Opracowane przeze mnie metody sterowania są efektem przede wszystkim rozwiązywania problemów pojawiających się w toku prowadzonych przeze mnie prac badawczych. W przypadku badań dotyczących zastosowania regulacji proporcjonalno-rezonansowej (P+R) w przekształtniku sieciowym [8, 10], prace wykonałem we współpracy z autorami idei implementacji regulatora o skończonym wzmocnieniu, która w znaczący sposób poprawiła dynamikę regulacji prądu.

Obszar zrealizowanych przeze mnie badań można podzielić na: problemy wysokoobrotowych napędów, zasilanych napięciami o częstotliwości 667 Hz [1, 2, 3], oraz zagadnienia związane z wprowadzaniem energii promieniowania słonecznego do pokładowej sieci o podwyższonej częstotliwości [4-10]. W tematyce związanej z badaniami sieci pokładowej współpracującej z napędami wysokoobrotowymi i fotowoltaicznymi źródłami energii, wyodrębniłem szczegółowe zadania naukowe rozwiązujące zdiagnozowane wcześniej lub

pojawiające się w trakcie badań problemy, które występują podczas procesu sterowania przekształtników energoelektronicznych [II.4.26, 2, 4, 5, 6].

W odniesieniu do napędów elektrycznych, zasilanych ze źródeł napięcia o podwyższonej częstotliwości, opracowane zostały i przebadane zagadnienia ujęte w następujących tematach badawczych:

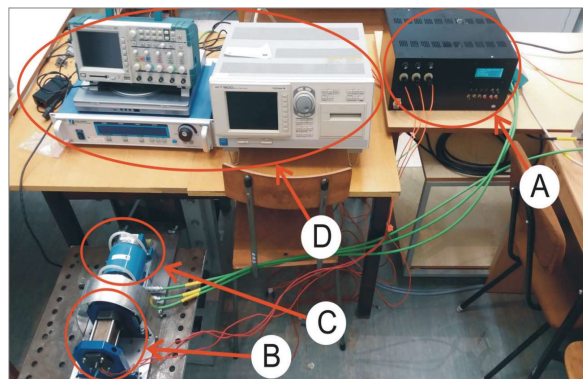
- a) Zasilany z obwodu pośredniczącego uniwersalny sterownik przekształtnika energoelektronicznego, dla dwu- lub trójfazowego wysokoobrotowego silnika indukcyjnego [2].
- b) Strategia sterowania w sytuacji podłączenia silnika indukcyjnego wirującego z nieznaną prędkością do źródła napięcia [1].
- c) Korekcja trajektorii wektora przestrzennego prądów zasilających wysokoobrotowy silnik indukcyjny, ograniczająca wpływ rezonansu elektromechanicznego na skuteczność rozruchu silnika o zwiększonym stosunku długości do średnicy wirnika [3].

Badania dotyczące podłączenia ogniw fotowoltaicznych do pokładowej sieci elektroenergetycznej o częstotliwości 400 Hz wykonane zostały dla problemów ujętych w następujących tematach badawczych:

- a) Problem szybkiej i skutecznej synchronizacji z napięciami sieci pokładowej o zwiększonej częstotliwości [4, 7, 9].
- b) Analiza procesów implementacji cyfrowej w rekonfigurowalnych strukturach logicznych sterownika przekształtników sieciowych [5].
- c) Szybki i skuteczny układ śledzenia mocy maksymalnej paneli fotowoltaicznych [6].
- d) Analiza układu regulacji proporcjonalno-rezonansowej przekształtnika sieciowego z ograniczonym wzmocnieniem umożliwiającym kompensację mocy biernej w sieci pokładowej [8, 10].
- e) Ograniczanie wpływu tętnień mocy na pozyskiwanie energii fotowoltaicznej w pokładowym, jednofazowym przekształtniku sieciowym [6].

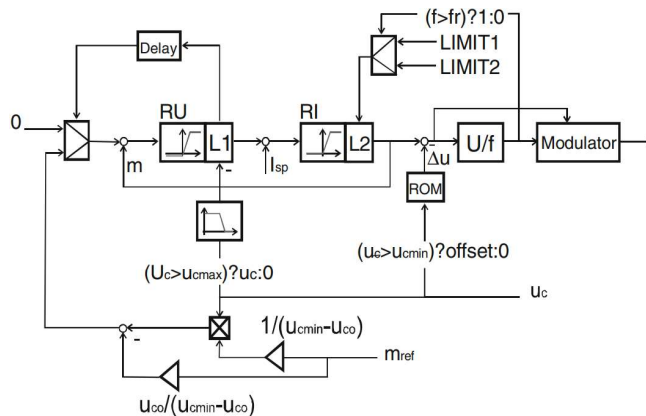
Podjęcie badań, których wyniki przedstawiono w publikacjach związanych z napędami podłączonymi do systemu zasilającego o częstotliwości 667 Hz, było efektem prowadzonych po doktoracie szeregu analiz i badań eksperymentalnych dotyczących wykorzystania napędów wysokoobrotowych w sprzęcie AGD oraz elektronarzędziach. Rezultaty tych badań opisane są m.in. w publikacjach [II.2.20, II.4.7, II.4.9, II.4.10, II.4.11, II.4.12 i II.4.26]. Podczas badań eksperymentalnych dotyczących wysokoobrotowego napędu z silnikiem indukcyjnym pojawił się problem związany z podłączeniem silnika do napięć zasilających w przypadku, gdy jego wirnik wiruje z nieznaną prędkością. Przeciwdziałanie stanom dynamicznym pojawiającym się

w takiej sytuacji było pierwszym zadaniem przedstawionego osiągnięcia naukowego, które zrealizowałem poprzez opracowany układ detekcji znaku mocy chwilowej, opatentowany (Patent nr 217727) i opisany w [1]. Wykonane analizy działania napędów wysokoobrotowych weryfikowane były za każdym razem poprzez badania eksperymentalne. Do przeprowadzenia tych badań skonstruowane były stanowiska laboratoryjne w oparciu o sterowniki zawierające logiczne układy rekonfigurowane FPGA oraz układy falowników trójfazowych, trójgałęziowych, z których zasilane były wysokoobrotowe dwu- i trójfazowe silniki indukcyjne. Przykładowe stanowisko badawcze pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Stanowisko badawcze z napędem wysokoobrotowym: A – opracowany przeze mnie trójfazowy falownik sterowany układem FPGA, B – silnik indukcyjny wysokoobrotowy, C – programowalne obciążenie, D – urządzenia pomiarowe

Opracowanie koncepcji uniwersalnego sterownika, implementowanego w układzie FPGA, który automatycznie rozpoznawał podłączony silnik wysokoobrotowy i odpowiednio konwertował sygnały modulujące falownika w zależności od wymaganego dwu- lub trójfazowego zasilania, było kolejnym zadaniem naukowym w mojej działalności badawczej. Wykonanie tego zadania poświadcza publikacja [2], w której opisano uniwersalny sterownik zasilany z obwodu pośredniczącego falownika. Sterownik ten pełnił dodatkowe funkcje, takie jak: odzyskiwanie energii wirującej masy, pomiar składowej aktywnej prądu, zmniejszenie wartości uchybu regulacji prędkości dla regulatora typu P, zmniejszenie poziomu reakcji regulatora prędkości dla małych uchybów, bezpieczny start i bezpieczne wyłączenie. Schemat opracowanego układu regulacji, którego działanie uzależniłem od wartości napięcia obwodu pośredniczącego pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Struktura układu regulacji napędu wysokoobrotowego powiązane z wartością napięcia obwodu pośredniczącego u_c [2]

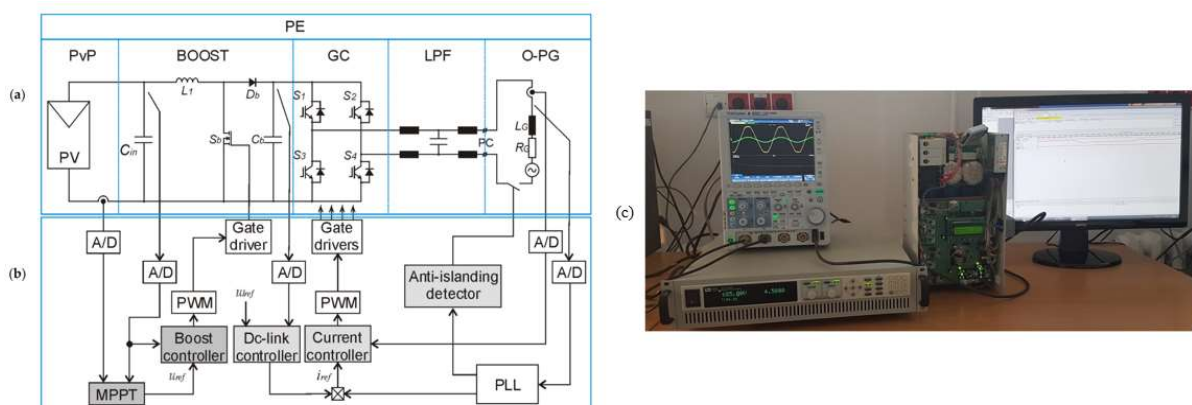
Opracowana koncepcja sterownika obejmowała wszystkie przeanalizowane wcześniej przeze mnie procesy zabezpieczeń cyfrowych, modulacji i regulacji. Podczas dalszych badań zaprojektowanego sterownika, który wykorzystany był w napędzie wysokoobrotowym z silnikiem indukcyjnym o zwiększonym stosunku długości wirnika do jego średnicy, zdiagnozowany został kolejny problem techniczny. Okazało się, że podczas rozruchu tego silnika dochodzi do zjawiska rezonansu elektromechanicznego, który powodował utknięcie wirnika lub otarcia o jego stojan. W przypadku napędu zasilanego napięciami o częstotliwości 667 Hz, częstotliwości rezonansowe były w okolicach częstotliwości 240 Hz oraz 400 Hz [II.4.9]. Rozwiązanie tego problemu zdefiniowało kolejne zadanie naukowe, które początkowo zostało wykonane poprzez usunięcie dwóch pasm częstotliwości z zakresu możliwych zmian częstotliwości przebiegów modulujących. Umożliwiło to skuteczne przeprowadzenie rozruchu silnika i doprowadzenie go do prędkości znamionowej, jednocześnie ograniczając możliwości regulacji prędkości w pełnym jej zakresie. Obserwacja dynamiki hodografu wektora przestrzennego prądów zasilających silnik wysokoobrotowy podczas rozruchu, wskazała jego odkształcenia w okolicach zarejestrowanych wcześniej częstotliwości, przy których dochodziło do utknięcia wirnika. Wnioski płynące z tej obserwacji wykorzystałem do opracowania metod korekcji trajektorii wektora przestrzennego prądów silnika. Opracowana została metoda korekcji trajektorii wektora przestrzennego prądów wykorzystująca wnioskowanie rozmyte [II.2.17, II.2.19], podwójną modulację [II.2.22] oraz metoda, która zaimplementowana została w układzie sterowania falownikiem napięcia opatentowanym (patent nr 227997) i opisanym w [3].

Badaniom nad układami sterowania napędami wysokoobrotowymi towarzyszyły poszukiwania lepszych sposobów prowadzenia procesów regulacji. Wcześniej opracowane przeze mnie strategie regulacji zdefiniowane były w naturalnym układzie współrzędnych, a ich

prostota podyktowana była przyjętą specyfiką zastosowania. Najważniejszą cechą miała być ich odporność na czynniki zewnętrzne oraz nieprawidłową lub złą eksploatację. Takiej odporności, przy jednocześnie ograniczonych gabarytach, oczekuje się od układów działających na pokładach statków, pojazdów kosmicznych i jako elementy awioniki. W związku z występowaniem tam sieci pokładowej o podwyższonej częstotliwości, zaawansowane metody regulacji wymagające przekształcenia do układu współrzędnych wirujących wymagają sprawnych i szybkich układów synchronizacji z napięciami sieci. Jest to szczególnie ważne, gdy w sieci pokładowej dochodzi do częstych procesów łączeniowych, związanych z podłączeniem lub odłączeniem przez przekształtniki energoelektroniczne układów napędowych lub awioniki. Znane z literatury metody synchronizacji dzielą się na dwie zasadnicze grupy: układy działające w dziedzinie częstotliwości i układy działające w dziedzinie czasu [4]. W układach przekształtnikowych jedno- i trójfazowych najczęściej wykorzystuje się trójfazową pętlę fazową zdefiniowaną w wirującym układzie współrzędnych d-q. Zastosowanie tej metody dla układu jednofazowego wymaga wykonania przekształcenia do wirtualnego układu d-q. Po przeanalizowaniu literatury poświęconej metodom synchronizacji, opracowałem, zaimplementowałem w układzie FPGA i przebadalem dyskretny, adaptacyjny filtr pasmowy jako synchronizator działający w dziedzinie częstotliwości oraz układ pętli synchronizacji fazy (PLL), jako układ działający w dziedzinie czasu [4]. Po przeprowadzeniu analizy porównawczej i scharakteryzowaniu cech przebadanych synchronizatorów okazało się, że synchronizator działający w oparciu o rekursywną, dyskretną transformatę Fouriera posiada najkrótsze czasy ustalenia się odpowiedzi, natomiast może zadowalająco działać tylko dla pojedynczej częstotliwości. W przypadku PLL, czas ustalenia się odpowiedzi zależy od rodzaju i stopnia zaburzeń i charakteryzuje się ograniczonym pasmem estymowanego napięcia [4]. Sytuacja ta zdefiniowała kolejne zadanie naukowe, jakim było opracowanie nowej metody synchronizacji, która byłaby szybsza od znanych metod, oraz potrafiłaby reagować na trudne do zdefiniowania lub przewidzenia zaburzenia. W pierwszym podejściu zaproponowałem układ dyskretny wykorzystujący logikę rozmytą współpracującą z generatorem kwadraturowym, w którym na podstawie próbek prędkości kątowej $\omega[n-1]$, uchybów kąta fazowego $\varepsilon[n]$ i $\varepsilon[n-1]$ dochodziło do estymacji jednostkowych przebiegów ortogonalnych składowej podstawowej napięcia wejściowego. Metodyka badań, implementacja cyfrowa w FPGA oraz uzyskane wyniki badań dla przebiegów o częstotliwości 50Hz oraz porównanie ich z wynikami dla synchronizatorów PLL oraz Fouriera opisane zostały w [4]. Kolejne zadania naukowe wynikają z problemów związanych z możliwością wprowadzania energii pozyskanej z promieniowania słonecznego do sieci pokładowej. W pierwszej kolejności skonstruowany i wykonany został przekształtnik

sieciowy, którego proces sterowania zaimplementowałem w układzie logiki programowalnej FPGA Altera EP4CE22E22C6N. Opracowanie i analiza działania sterownika obsługującego kilka przekształtników sieciowych sprzęgniętych z jedną siecią pokładową, początkowo o częstotliwości 50Hz, i oszacowanie korzyści energetycznych wynikających z zastosowania synchronizatora rozmytego było celem, którego osiągnięcie przeze mnie dokumentuje publikacja [5]. Badania przeprowadzone i opublikowane w pracy [5] wskazały realne korzyści płynące z zastosowania szybkich układów synchronizacji dla sieci o częstotliwości 50Hz. Weryfikacja opracowanego synchronizatora z rozmytą estymacją prędkości kątownej dla jednofazowej sieci pokładowej o częstotliwości 400 Hz przeprowadzone zostały i opisane z kolei w publikacji [7]. W tej pracy skupiłem się przede wszystkim na analizie i weryfikacji czasu odpowiedzi układu synchronizacji przy występujących zaburzeniach w sieci pokładowej i porównaniu ich wartości z czasem odpowiedzi układu pętli synchronizacji fazy PLL.

Kolejne zadanie badawcze dotyczyło opracowania strategii działania układu regulacji przekształtnika sieciowego współpracującego z jednofazową siecią o podwyższonej częstotliwości. Przyjąłem, że częstotliwość napięcia wynosi 400Hz. Opracowany analitycznie i wykonany sterownik realizował w sposób współbieżny zadania śledzenia punktu mocy maksymalnej (MPPT), sterowania napięciem obwodu pośredniczącego (DC-link controller) i prądem sieci (Current controller), synchronizacji opartej o metodę pętli synchronizacji fazy (PLL) oraz zabezpieczenia przed pracą wyspową (Anti-islanding detector). Schemat blokowy struktury przekształtnika sieciowego (PE) wraz z strukturą układu regulacji pokazany jest na rysunku 3.



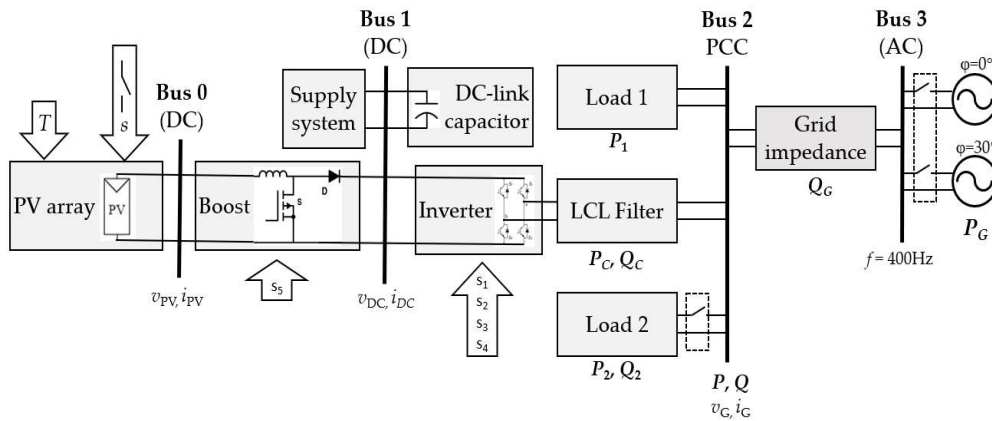
Rys. 3. Przekształtnik sieciowy wraz z układem regulacji i zabezpieczeń: (a) schemat blokowy części energoelektronicznej, (b) struktura układu regulacji, (c) zdjęcie stanowiska badawczego [6]

W związku z sprzęganiem sieci jednofazowej z źródłem prądu stałego istnieje problem powstawania tętnień mocy, które mogą wpływać na proces pozyskiwania energii z paneli fotowoltaicznych. Z przeprowadzonej analizy literatury wynika, że redukcja wpływu tętnień mocy może być uzyskana przez zastosowanie zmodyfikowanych topologii układów przekształtnikowych, bądź poprzez odpowiednie zaprojektowanie układu sterowania (a: Zhang, L.; Ruan, X.; Ren, X. *Second Harmonic Current Reduction for Two-Stage Inverter with Boost-Derived Front-End Converter: Control Schemes and Design Considerations*. *IEEE Trans. Power Electron.* 2018; b: Shi, Y.; Liu, B.; Duan, S. *Low-Frequency Input Current Ripple Reduction Based on Load Current Feed-Forward in Two-Stage Single-Phase Inverter*. *IEEE Trans. Power Electron.* 2016, 31; c: Wang, W.; Ruan, X. *A Modified Reference of an Intermediate Bus Capacitor Voltage-Based Second-Harmonic Current Reduction Method for a Standalone Photovoltaic Power System*. *IEEE Trans. Power Electron.* 2016, 31). W zrealizowanych badaniach, zastosowałem strategię regulacji z dwoma pętlami sprzężenia zwrotnego kontrolującymi prąd przekształtnika sieciowego i napięcie obwodu pośredniczącego oraz regulator przekształtnika podwyższającego napięcie, współpracujący z układem śledzącym punkt mocy maksymalnej. W pierwszej fazie badań przeprowadziłem analizę znanych metod śledzenia punktu mocy maksymalnej, zwłaszcza metod inkrementacyjnych, z których wybrałem do implementacji cyfrowej metodę znaną pod angielską nazwą *Incremental Conductance*. Metody inkrementacyjne poszukiwania punktu mocy maksymalnej charakteryzują się tym, że wartość przewidywanej lokalizacji tego punktu na charakterystykach paneli fotowoltaicznych zmienia się dynamicznie, nawet w statycznych warunkach atmosferycznych. Dlatego postawiłem sobie za cel opracowanie nowej strategii poszukiwania punktu mocy maksymalnej, w której na podstawie dyskretnych wartości zmierzonego prądu i napięcia fotowoltaicznego wyznaczana jest w sposób ciągły wartość referencyjna prądu, odpowiadającego punktowi mocy maksymalnej. Opracowana przeze mnie metoda została porównana z najbliższą pod kątem sposobu działania metodą *Incremental Conductance*, a uzyskane wyniki przedstawiłem w publikacji [6]. Ograniczenie wpływu tętnień mocy uzyskałem w układzie szerokopasmowego regulatora prądu i wąskopasmowego regulatora napięcia obwodu pośredniczącego, zgodnie z informacją uzyskaną poprzez analizę literatury (Vitorino, M.; Alves, L.; Wang, R.; Correa, M. *Low-Frequency Power Decoupling in Single-Phase Applications: A Comprehensive Overview*. *IEEE Trans. Power Electron.* 2017, 32, 4).

Dalsze prace związane z badaniami układów synchronizacji, szczególnie przydatnymi w przypadku synchronizacji z napięciami o podwyższonej częstotliwości, dotyczyły modyfikacji struktury synchronizatora, powodującej skrócenie czasu mierzonego od zaburzenia do stanu

uzyskania stanu synchroniczności. Opracowałem, zaprojektowałem, przeanalizowałem i eksperymentalnie zweryfikowałem układ synchronizacji składający się z generatora kwadraturowego o postaci układu SOGI (ang. *Second Order Generalized Integrator*), w którym proces automatycznego strojenia wykorzystywał zasady sformułowane lingwistycznie (zapisane w postaci modułu logiki rozmytej) zdefiniowane w wirującym układzie współrzędnych. Synchronizator ten przebadłem w stanach statycznych i dynamicznych dla różnego rodzaju charakterystycznych zaburzeń występujących w sieci 400Hz, a uzyskane wyniki opisałem w artykule [9].

W małych, lokalnych sieciach pokładowych często obserwuje się przepływ prądów biernych, wynikający z dołączanych do niej odbiorników reaktancyjnych. Możliwość kompensacji mocy biernej w sieci pokładowej przy pomocy przekształtnika sieciowego stała się kolejnym tematem badawczym. Temat ten nie był już realizowany indywidualnie, a w zespole badawczym obejmującym Politechnikę Rzeszowską oraz Akademię Górniczo-Hutniczą. Opracowana przez prof. Stanisława Piróga idea implementacji regulatora proporcjonalno-rezonansowego o skończonym wzmocnieniu, została wykorzystana i wstępnie przebadana w układzie FPGA, dla przypadku trójfazowej sieci o standardowej częstotliwości 50 Hz. Wraz z zespołem wykonałem badania regulatora w układzie HiL (ang. *Hardware in Loop*) w celu weryfikacji eksperymentalnej jego współzależności czasowych i zdefiniowania możliwości implementacji w systemie pracującym z siecią o podwyższonej częstotliwości. Mój udział w pracy obejmował zdefiniowanie koncepcji badań, opracowanie założeń i modelu symulacyjnego układu przekształtnika wraz z modelem układu sterowania, przeprowadzenie badań symulacyjnych, walidację układu zaimplementowanego w FPGA, koncepcję i opracowanie pomiarów dla stanów dynamicznych oraz sformułowanie wniosków końcowych, zwłaszcza pod kątem zastosowania regulatora w sieci o podwyższonej częstotliwości. Wyniki uzyskane podczas badań opublikowane zostały w artykule [8]. W dalszej kolejności zadanie to zrealizowane zostało poprzez implementację regulatora proporcjonalno-rezonansowego o skończonym wzmocnieniu w układzie jednofazowego przekształtnika sieciowego współpracującego z siecią pokładową o częstotliwości 400Hz. Schemat badanego systemu pokazano na rysunku 4.



Rys. 3. Schemat blokowy systemu przekształtnika fotowoltaicznego współpracującego z siecią pokładową 400Hz [10]

Przeanalizowałem możliwości kompensacji mocy biernej w lokalnej sieci pokładowej, związane z nieuzyskaniem wartości prądu znamionowego w przekształtniku sieciowym i zbadałem zdolności regulacji mocy czynnej i biernej w badanym systemie. W obszarze opisanych badań jestem współtwórcą hipotezy badawczej i pomysłodawcą przeprowadzonych badań. Opracowałem zakres prowadzonych eksperymentów i zdefiniowałem badane przypadki dotyczące stanów statycznych i dynamicznych. W oparciu o zdefiniowaną przeze mnie koncepcję układu regulacji wykonałem model symulacyjny badanego systemu wraz z modelem układu sterowania. Mój współudział w implementacji cyfrowej układu regulacji P+R polegał na dopasowaniu sygnałów cyfrowych do wymagań wcześniej opracowanego przeze mnie stanowiska badawczego. Otrzymane wyniki pomiarów poddałem analizie i sformułowałem w oparciu o nie wnioski końcowe. Wyniki wykonanych prac przedstawione zostały w postaci publikacji [10].

4.3.2. Omówienie wyników prac badawczych i ich ewentualnego wykorzystania

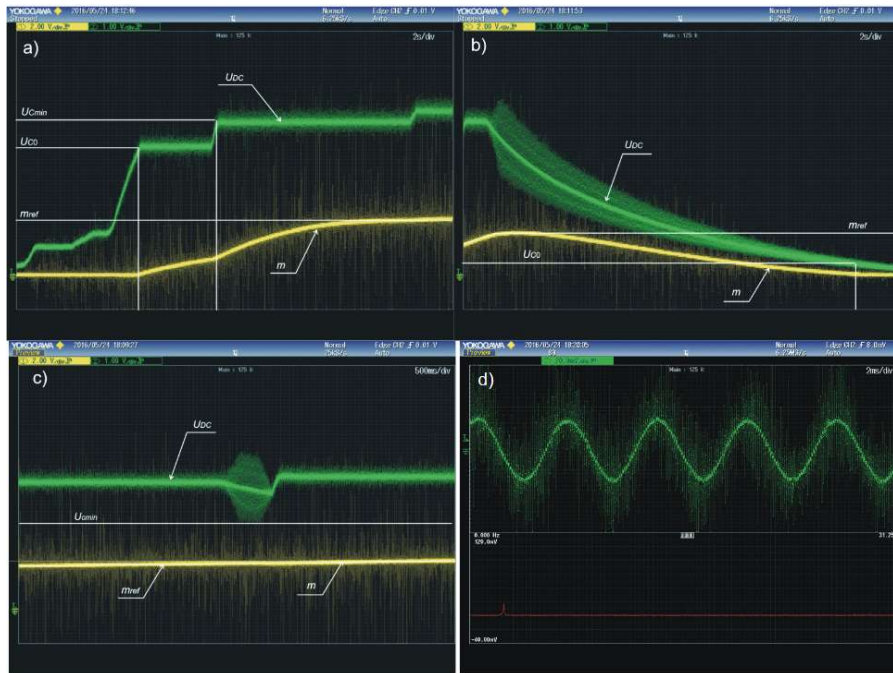
Realizując tematy badawcze powiązane z badaniem wysokoobrotowych napędów indukcyjnych uzyskano nowe strategie sterowania eliminujące lub ograniczające problemy wskazane w rozdziale 4.3.1. W efekcie przeprowadzonych prac badawczych powstały modele laboratoryjne m.in. uniwersalnych układów sterowania przekształtników o strukturze trójfazowej, trójgałęziowej. W związku z uniwersalnością tychże sterowników, ich wykorzystanie na platformach mobilnych jest szczególnie istotne, gdyż spełniane funkcje zwiększają niezawodność układu napędowego. Jako że wykonane badania mają swoją genezę

w obszarze zastosowań dla sprzętu AGD, wykorzystanie opracowanych układów nie jest limitowane wyłącznie do współpracy z pokładowymi sieciami zasilającymi.

W procesie podłączania silnika indukcyjnego wirującego z nieznaną prędkością do sieci zasilającej (ang. *flystart*) – za pośrednictwem trójfazowego, trójgałęziowego falownika napięcia – układ sterowania może w założony sposób kształtować przebiegi napięć zasilających. W sytuacji, gdy układ sterowania realizuje rozruch silnika polegający na zwiększaniu napięcia i częstotliwości, dla częstotliwości mniejszych od częstotliwości wynikających z nieznannej prędkości wirnika silnik będzie znajdował się w trybie pracy generatorowej. W tym stanie następuje zwrot energii wirującej masy silnika do źródła napięć zasilających. Energia ta gromadzona jest w kondensatorze obwodu pośredniczącego i wymusza zastosowanie kondensatora o zwiększonej pojemności elektrycznej i o zwiększonym napięciu. Obostrzenia dotyczące parametrów kondensatora obwodu pośredniczącego często dyktowane są ekonomią, a w zastosowaniu do platform mobilnych gabarytami. Ograniczenie pracy generatorowej silnika sprawia zatem, że przekształtnik energoelektroniczny silnika indukcyjnego jest mniejszy, z racji możliwości zastosowania kondensatora o zmniejszonej pojemności i dobranej na pracę przy niższym maksymalnym napięciu. Zmniejszenie wpływu pracy generatorowej na kondensator obwodu pośredniczącego, podczas podłączania go przy nieznannej prędkości, uzyskałem poprzez układ realizujący opatentowaną metodę dokonującą detekcji przejścia z pracy generatorowej na silnikową [1]. Uruchamiając napęd przy dużej częstotliwości napięć zasilających (odpowiadającej maksymalnej częstotliwości pracy silnika) i małej amplitudzie, a następnie obniżając częstotliwość napięć przy nie zmieniającej się amplitudzie tychże przebiegów, rozpoznawana była chwila, w której częstotliwość napięć zasilających zrównuje się z częstotliwością odpowiadającą bieżącej częstotliwości wirowania wirnika (częstotliwość ta pozostaje w relacji z liczbą par biegunów silnika). Stosując opatentowaną przeze mnie metodę, rozpoznawany był moment zmiany trybu pracy silnika, implikując aktywację głównej strategii sterowania, np. zgodnej z charakterystyką $u/f=\text{const}$. W ten sposób w znacznym zakresie ograniczona została praca napędu w trybie generatorowym, wynikająca np. z wyłączenia i ponownego szybkiego załączenia źródeł napięć zasilających napęd. W opatentowanym sposobie sterowania założyłem, że trójfazowe przebiegi modulujące odtwarzane są przez falownik napięcia jako napięcia zasilające silnik. Stanowią one zatem sygnały będące miarą składowej podstawowej napięć, nie posiadając tym samym wysokoczęstotliwościowych składowych odkształcenia pochodzących od procesu modulacji. Sygnały te, po przemnożeniu przez zmierzone prądy silnika i po zsumowaniu tychże iloczynów wyznaczonych dla każdej fazy, osiągają wartość proporcjonalną do wartości mocy chwilowej. W dalszym etapie przetwarzania

informacji, wynik sumowania poddaje się filtracji dolnoprzepustowej. Filtracja ta ma na celu wyodrębnienie składowej stałej z otrzymanego wcześniej przebiegu. Po wykonaniu filtracji uzyskuje się składową stałą, która zmienia znak w chwili, gdy następuje przejście pomiędzy pracą silnikową, a pracą generatorową silnika indukcyjnego. Odfiltrowany sygnał, proporcjonalny do mocy chwilowej, porównany jest w komparatorze z zerem, skutkując wytworzeniem binarnego sygnału q . Binarny sygnał q zmienia stan na przeciwny za każdym razem, gdy silnik przechodzi z pracy generatorowej na silnikową lub na odwrót. Właściwości sygnału logicznego q wykorzystałem do bramkowania procesów regulacyjnych w ten sposób, że dla wartości sygnału odpowiadającego pracy silnikowej regulator zmniejsza częstotliwość przebiegów napięć przy stałej, małej wartości amplitudy. W chwili zmiany sygnału q na wartość odpowiadającą pracy generatorowej, układ regulacji przełącza się na realizację podstawowej strategii sterowania, np. $u/f = \text{const.}$, ograniczając tym samym występowanie niepożądanych stanów dynamicznych.

Przeprowadzone analizy i badania dotyczące uniwersalnego sterownika cyfrowego obsługującego zarówno wysokoobrotowe silniki dwu- i trójfazowe doprowadziły do wykonania sterownika falownika, charakteryzującego się zwiększoną niezawodnością pracy. Sterownik ten działał w oparciu o algorytmiczną sieć stanów, która wykorzystując wynik pomiaru prądu identyfikowała podłączony silnik i przekształcała funkcje modulujące z układu trójfazowego na dwufazowy. Dodatkowo, wprowadziłem modyfikację strategii regulacji, uzależniając procesy regulacji prądu i prędkości od wartości napięcia w obwodzie pośredniczącym. Pozwoliło to na zasilanie sterownika z kondensatora obwodu pośredniczącego i wyłączenie go w sytuacji, gdy ilość energii w obwodzie pośredniczącym była niewystarczająca do pracy normalnej. Skutkiem uzależniania regulacji od napięcia na kondensatorze była modyfikacja wartości referencyjnej prędkości silnika. W konsekwencji, każdorazowe pojawienie się napięcia zasilającego na zaciskach silnika miało miejsce przy zatrzymanym silniku. Dzięki tak zmodyfikowanej strategii zasilania opracowanego sterownika, okazało się zbędne stosowanie opatentowanego układu ograniczającego stany dynamiczne, opisanego w [1]. Na rysunku 4 pokazano oscylogramy ilustrujące powiązanie wartości prędkości referencyjnej z wartością napięcia w obwodzie pośredniczącym.



Rys. 4. Przebiegi napięcia obwodu pośredniczącego U_{DC} oraz zmodyfikowanej wartości referencyjnej m : (a) wzrastające napięcie U_{DC} , (b) odłączenie obwodu pośredniczącego od źródła zasilania, (c) chwilowy zanik napięcia zasilającego; (d) przebieg zarejestrowanego prądu i wynik analizy FFT [II.4.26]

Napięcie obwodu pośredniczącego mniejsze od granicznej wartości pozwalającej na zasilanie sterownika (U_{c0}) powoduje zatrzymanie się napędu niezależnie od wartości referencyjnej. Wzrost napięcia powyżej wartości granicznej do wartości minimalnej, gwarantującej właściwe warunki zasilania sterownika (U_{cmin}), modyfikuje liniowo wartość referencyjną. Powyżej wartości minimalnej napięcia w obwodzie pośredniczącym, wartość referencyjna nie jest modyfikowana, dlatego po jej przekroczeniu układ zasilający sterownik nie wpływa na przyjętą strategię kontroli prędkości [II.4.26].

Wspomniany w rozdziale 4.3.1 problem rozruchu silników wysokoobrotowych z wirnikiem o zwiększonym stosunku długości do średnicy, skutkujący otarciami wirnika o stojan, wyeliminowałem poprzez aktywną korektę wektora przestrzennego prądów zasilających silnik. W przypadku pojawienia się zmiany długości wektora przestrzennego prądów, nie wynikającej z procesu rozruchu, następowała chwilowa korekta wartości sygnałów modulujących pracę łączników falownika. Korekta ta wprowadzana była poprzez dodatkową modulację sygnałów modulujących. W konsekwencji uchyb długości wektora przestrzennego prądów falownika powodował zmianę szerokości impulsów wyjściowych dodatkowego modulatora. Powstające impulsy miały zatem szerokość proporcjonalną do wartości uchybu modułu wektora przestrzennego prądów i zostały wykorzystane do sterowania łącznikiem przekazującym przebiegi sygnałów modulujących napięcie wyjściowe falownika do głównego

modulatora naturalnego. W konsekwencji uzyskałem funkcje modulujące głównego modulatora w postaci impulsów, których szerokość zależała w relacji odwrotnej proporcjonalności od uchybu modułu wektora przestrzennego prądów, a amplituda była proporcjonalna do aktualnej wartości głównych funkcji modulujących. Tak powstałe sygnały, w przypadku braku odkształcenia trajektorii wektora przestrzennego prądu, były tożsame z głównymi funkcjami modulującymi, a w przypadku pojawienia się różnego od zera uchybu z ich przebiegów wycinane były fragmenty o szerokości od niego zależnej. Matematycznie, działanie takie odpowiada iloczynowi dwóch funkcji, z których jedną stanowi główna funkcja modulująca, a drugą funkcja dopełnienia do jedności względnego uchybu modułu wektora przestrzennego prądów. Analizę tę wykorzystałem do opracowania układu sterowania falownikiem, z którego zasilany był silnik wysokoobrotowy. Podczas badań eksperymentalnych okazało się, że zaproponowana strategia sterowania napędem pozwala na przejście fazy rozruchu bez utknięcia wirnika przy częstotliwościach rezonansu elektromechanicznego. Na sposób sterowania oraz falownik otrzymałem patent UP RP nr 227997.

Wszystkie sformułowane koncepcje pracy uniwersalnego sterownika napędu wysokoobrotowego zweryfikowałem eksperymentalnie. Opracowane urządzenia mogą być wykorzystane tam, gdzie najważniejsza jest bezpieczna praca układu napędowego, zwłaszcza w przypadku zasilania go z sieci pokładowej. Wykonane sterowniki mają zweryfikowany obszar poprawnej pracy w napędach z silnikami o małej mocy, do 1kW. W zakresie napędów większych mocy i o wymaganej dużej precyzji kontroli prędkości, wykonane badania mogą okazać się niewystarczające z uwagi na wykorzystywanie w procesie regulacji sprzężenia od składowej aktywnej prądów wyznaczonej w sposób uproszczony [II.4.26]. Okazało się, że badany zakres mocy jest wystarczający, by opracowane strategie regulacji i zabezpieczeń mogły być stosowane w napędach pracujących jako pokładowe elementy wykonawcze.

Realizując zadania badawcze dotyczące problemów synchronizacji z napięciami zasilającymi, opracowałem dwa synchronizatory, które wykorzystywały w procesie estymacji składowej podstawowej sygnału wejściowego korektory opisane logiką rozmytą. W pierwszej wersji prowadzonych w tym zakresie badań, przyjęta metodyka obejmowała weryfikację działania implementacji cyfrowej w FPGA synchronizatora rozmytego dla przebiegów o częstotliwości 50Hz, po to, abym mógł oszacować korzyści wynikające z zastosowania zaproponowanej strategii synchronizacji w relacji do znanych i stosowanych powszechnie metod synchronizacji PLL. Pierwsze testy przeprowadziłem w układzie FPGA EP2C20F484, gdzie proces synchronizacji wykorzystywał wyznaczoną w trybie *off-line* tzw. przestrzeń przejścia modułu rozmytego FLC. Skwantowane i zapisane wartości odpowiedzi modułu FLC, dla

dyskretnych wartości prędkości kątovej oraz aktualnej i poprzedniej próbki uchybu kąta fazowego, pozyskiwane były poprzez zaproponowane przeze mnie złożenie adresu, wynikające z opracowanego sposobu zapisu przestrzeni trójwymiarowej w pamięci typu ROM. W efekcie uzyskałem synchronizator, który osiągał stan synchronizacji w czasie krótszym, niż powszechnie stosowany synchronizator wykorzystujący pętlę synchronizacji fazy. W dalszym etapie prac badawczych zastosowałem opracowany synchronizator w układzie przekształtnika sieciowego współpracującego z panelami fotowoltaicznymi. Przeanalizowałem, zaprojektowałem i wykonałem model sterownika wykorzystujący układ Altera FPGA EP4CE22E22C6N, obsługujący w sposób niezależny kilka instalacji fotowoltaicznych. Sterownik ten zweryfikowałem eksperymentalnie, wykorzystując go w stanowisku badawczym zawierającym przekształtnik podwyższający napięcie i falownik sieciowy. Kontrolowane procesy dotyczyły metody poszukiwania mocy maksymalnej MPPT typu P&O, ochrony przed pracą wyspowa oraz maksymalizacji mocy czynnej wprowadzanej do sieci, pozyskując informację o kształcie przebiegu składowej czynnej prądu referencyjnego z standardowego synchronizatora typu PLL oraz opracowanego synchronizatora rozmytego. W wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych, które dotyczyły stanów dynamicznych wiążących się ze zmianami temperatury zewnętrznej, poziomu nasłonecznienia i zaburzeń występujących w sieci, okazało się, że zastosowanie opracowanej metody synchronizacji pozwala na zwiększenie sumarycznej energii wprowadzanej do sieci, w odniesieniu do przypadku z zastosowaniem standardowego synchronizatora PLL. Jako efekt tych prac, potwierdzony eksperymentalnie, powstał przekształtnik fotowoltaiczny o zwiększonej sprawności energetycznej w zakresie pracy dynamicznej. Korzyści energetyczne zmierzone dla charakterystycznych, pojedynczych zaburzeń zostały wykorzystane do obliczenia wielkości rocznej energii wprowadzanej przez przekształtnik do sieci, która okazała się większa o 2,27% od energii wprowadzonej z wykorzystaniem standardowego synchronizatora PLL (dla tej samej liczby charakterystycznych zaburzeń).

W kolejnej fazie prowadzonych badań opracowałem, przeprowadziłem analizę działania oraz przebadłem eksperymentalnie układ śledzący punkt mocy maksymalnej, którego zasada działania pokazana została na rysunku 2 w publikacji [6]. Ten autorski sposób osiągania punktu mocy maksymalnej w panelach fotowoltaicznych charakteryzuje się przede wszystkim wyeliminowaniem inkrementacyjnych zmian wielkości referencyjnej, odpowiadającej w układzie regulacji za prąd ładowania kondensatora obwodu pośredniczącego. Badania przeprowadziłem w układzie jednofazowego przekształtnika sieciowego, który podłączony był do pokładowej sieci o podwyższonej częstotliwości równej 400 Hz. Podstawowym celem

opracowanego i wykonanego układu regulacji było dostarczenie do sieci pokładowej energii pozyskanej z paneli PV. Opracowany układ regulacji prądu kondensatora obwodu pośredniczącego, w oparciu o autorski algorytm MPPT, działał niezależnie od regulatora prądu sieci i powodował jedynie podwyższanie lub obniżanie napięcia obwodu pośredniczącego. Stabilizacja napięcia w DC-linku wykonywana była poprzez zmianę mocy oddawanej przez falownik do sieci w taki sposób, aby tętnienia mocy wynikające z jej bilansu wpływały jedynie na napięcie obwodu pośredniczącego. Uzyskałem dzięki tak zorganizowanemu procesowi regulacji i opracowanemu układowi MPPT przekształtnik fotowoltaiczny, współpracujący z pokładową siecią o częstotliwości 400Hz, który posiadał lepsze właściwości śledzenia punktu mocy maksymalnej, niż przekształtnik z układem śledzącym realizującym standardowy algorytm *Incremental conductance* oraz ograniczał wpływ tętnień mocy na pracę przekształtnika.

Opracowany i wykonany model przekształtnika fotowoltaicznego, współpracującego z siecią pokładową o częstotliwości 400 Hz, w kolejnej fazie badań ulepszyłem poprzez implementację synchronizatora rozmytego, który był wstępnie przebadany dla falownika podłączonego do sieci o częstotliwości 50 Hz [4]. Hipoteza, że podobnie jak dla sieci o częstotliwości 50 Hz, podwyższona do 400 Hz częstotliwość nie wpłynie na ograniczenie skuteczności i krótszego czasu ustalenia odpowiedzi opracowanego układu, w stosunku do standardowego synchronizatora PLL, została zweryfikowana eksperymentalnie. Realizując badania opracowanego synchronizatora rozmytego, analizując problemy techniczne i implementacyjne, zmodyfikowałem układ synchronizacji poprzez wprowadzenie znanego i powszechnie stosowanego przekształcenia stacjonarnego układu współrzędnych do układu współrzędnych wirujących i zastosowanie lingwistycznie sformułowanych reguł korygujących prędkość kątową generatora kwadraturowego. Uzyskałem w ten sposób nową strukturę synchronizatora rozmytego, którą zaimplementowałem w układzie przekształtnika sieciowego, dostarczającego energię uzyskaną z paneli fotowoltaicznych do pokładowej sieci 400 Hz. Sformułowane reguły korekcji modułu rozmytego, opisane w postaci zbiorów o trójkątnej funkcji przynależności, dostroiłem metodą gradientową (zgodnie z metodyką optymalizacji Nomury), uzyskując synchronizator o skróconym czasie odpowiedzi w badanych stanach dynamicznych względem innych, powszechnie stosowanych synchronizatorów: ePLL, Inverse Park PLL, PLL, czy T4-delay. Zastosowanie opracowanej metody w zaprojektowanym przekształtniku sieciowym współpracującym z siecią pokładową, zwiększyło sprawność jego pracy przy zapadach napięcia, występowaniu interharmonicznych i subharmonicznych, a także podczas zmian parametrów napięcia, takich jak częstotliwość i faza [7].

Końcowa faza badań opracowanego, pokładowego przekształtnika sieciowego dotyczyła zastąpienia ciągłego regulatora prądu regulatorem proporcjonalno-rezonansowym o ograniczonym wzmocnieniu. Wstępne badania przeprowadzone zostały dla układu trójfazowego przekształtnika sieciowego współpracującego z siecią o częstotliwości 50 Hz. Transmitancja regulatora proporcjonalno-rezonansowego o skończonym wzmocnieniu przekształcona została do postaci ułatwiającej jego implementację cyfrową, opierającą się o standardowe bloki: proporcjonalny, całkujący i proporcjonalno-całkujący. Wykonane testy stanów dynamicznych przeprowadzone zostały w pierwszej kolejności na cyfrowym modelu przekształtnika sieciowego, który uruchomiony był jako proces współbieżny wykonywany w tym samym układzie FPGA, co procesy regulacji. Ostateczna walidacja wykonana została w układzie trójfazowego przekształtnika sieciowego, uzyskując tym samym przekształtnik charakteryzujący się lepszą dynamiką, niż w przypadku, gdy rolę regulatora prądu pełnił regulator proporcjonalno-całkujący. Dodatkowo, opracowany układ regulacji umożliwiał kontrolę składowej biernej prądu wprowadzanego do sieci, zatem mógł być wykorzystany do kompensacji mocy biernej. Podstawową rolą przekształtnika fotowoltaicznego jest maksymalizacja energii wytworzonej w panelach fotowoltaicznych i dostarczenie jej do sieci. Tak samo jest w przypadku, gdy falownik podłączony jest do sieci pokładowej. Jak wykazano w publikacji [8], jeżeli składowa aktywna prądu przekształtnika jest mniejsza od wartości nominalnej, wtedy pojawia się możliwość generowania niezerowej składowej biernej. Kontrola składowej biernej w falowniku sieciowym jest szczególnie istotna w sieciach pokładowych, gdyż umożliwia ona kompensację mocy biernej, wynikającej z podłączenia do niej innych odbiorników energii. Zwiększa to przepustowość sieci i redukuje straty energii na rezystancjach sieci. Koncepcja wykorzystania jednofazowego przekształtnika fotowoltaicznego współpracującego z siecią pokładową o częstotliwości 400 Hz do kompensacji mocy biernej została przebadana i opublikowana w [10]. Zastępując regulator ciągły typu PI regulatorem proporcjonalno-rezonansowym, badany wcześniej układ regulacji zaprojektowano do postaci umożliwiającej kontrolę składowej biernej prądu i kompensację mocy biernej sieci pokładowej. Wykonane testy w stanach statycznych i w stanach dynamicznych wykazały skuteczność kompensacji mocy biernej i brak wpływu stanów dynamicznych na jej skuteczność. W związku z oddzieleniem układu regulacji prądu obwodu pośredniczącego i powiązanie go z układem śledzenia punktu mocy maksymalnej paneli PV, zmiany poziomu nasłonecznienia, temperatury i dynamika układu MPPT nie wpływały na kompensowaną moc bierną. Zmiany mocy biernej widoczne były tylko wtedy, gdy do zaburzeń dochodziło po stronie sieci pokładowej. Przyczyną ich nie był układ regulatora proporcjonalno-rezonansowego, a estymator składowych

kwadraturowych prądu i napięcia sieci. W wyniku realizacji tej fazy badań ulepszony został przekształtnik pokładowy współpracujący z siecią 400 Hz, który poprzez zastosowanie regulatora proporcjonalno-rezonansowego wykazywał lepsze właściwości dynamiczne niż w wersji z regulatorem typu PI i umożliwiał kompensację mocy biernej.

Podsumowanie

Przedstawione osiągnięcie naukowe znajduje zastosowanie przede wszystkim w obszarze platform, na których istnieje sieć pokładowa o podwyższonej częstotliwości. Są to przede wszystkim statki wodne, platformy latające i pojazdy kosmiczne. Opracowane rozwiązania układów napędowych wysokoobrotowych, charakteryzujące się niezawodną pracą, małymi gabarytami, odpornością na błędy, mogą być stosowane jako tzw. krytyczne elementy napędowe awioniki. Elementy te, zasilane z sieci pokładowej, mogą częściowo zużywać energię pochodzącą ze źródeł odnawialnych. Dzięki opracowaniu przekształtnika sieciowego, wprowadzeniu nowych rozwiązań w układzie regulacji, energia odnawialna może być efektywniej wykorzystana, a sam przekształtnik może być wykorzystany do kompensowania mocy biernej na pokładzie platformy.

Za swój główny wkład do nauki w obszarze dyscypliny elektrotechnika uważam:

- opracowanie metody podłączenia silnika wysokoobrotowego wirującego z nieznaną prędkością do źródła napięcia, która ogranicza pracę generatorową, a tym samym zaburzenia w sieci pokładowej,
- opracowanie strategii regulacji falownikiem trójgałęziowym, kontrolującym składową aktywną prądu, zapewniającego bezpieczną pracę napędu wysokoobrotowego, który automatycznie dostosowuje modulację do silnika wysokoobrotowego dwu- lub trójfazowego,
- opracowanie metod rozruchu wysokoobrotowych silników indukcyjnych z wirnikiem o zwiększonym stosunku długości do jego średnicy, które pozwalają uniknąć utknięcia wirnika wskutek rezonansu elektromechanicznego,
- opracowanie samo-zasilającego się układu regulacji z obwodu pośredniczącego falownika,
- opracowanie i analizę metod sterowania napędem wysokoobrotowym w układach rekonfigurowalnych FPGA i sformułowanie wniosków potwierdzonych eksperymentalną weryfikacją,

- przeprowadzenie badań porównawczych układów regulacji napędów wysokoobrotowych i sformułowanie wniosków końcowych,
- opracowanie dwóch metod synchronizacji z odkształconym napięciem, wykorzystujących rozmytą korekcję częstotliwości,
- zdefiniowanie zakresu i charakteru prowadzonych badań i weryfikację eksperymentalną opracowanych synchronizatorów w systemie pokładowej sieci o częstotliwości 400 Hz oraz sformułowanie wniosków końcowych,
- opracowanie metody konduktancyjnej, ciągłej poszukiwania punktu mocy maksymalnej w panelach fotowoltaicznych przeznaczonej do pracy w systemach pokładowych,
- analizę działania cyfrowego układu sterowania z proporcjonalno-rezonansowym regulatorem o skończonym wzmocnieniu jako regulatora prądu przekształtnika fotowoltaicznego jedno- i trójfazowego,
- opracowanie układu regulacji jednofazowym przekształtnikiem fotowoltaicznym współpracującym z pokładową siecią o częstotliwości 400 Hz, charakteryzującego się redukcją wpływu tętnień mocy na panele PV,
- opracowanie koncepcji stanowiska badawczego, implementację w układzie FPGA i sformułowanie wniosków wynikających z przeprowadzenia badań jednofazowego systemu pokładowego o częstotliwości 400 Hz bez kontroli składowej biernej prądu,
- opracowanie, implementację cyfrową w FPGA i zdefiniowanie zakresu i charakteru badań statycznych, dynamicznych i porównawczych systemu źródła fotowoltaicznego podłączonego do sieci pokładowej, umożliwiającego kompensację mocy biernej oraz sformułowanie wniosków.

W moim przekonaniu przedstawione osiągnięcia wyczerpują wymagania, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy.

5. INFORMACJA O WYKAZYWANIU SIĘ ISTOTNĄ AKTYWNOŚCIĄ NAUKOWĄ ALBO ARTYSTYCZNĄ REALIZOWANĄ W WIĘCEJ NIŻ JEDNEJ UCZELNI, INSTYTUCJI NAUKOWEJ LUB INSTYTUCJI KULTURY, W SZCZEGÓLNOŚCI ZAGRANICZNEJ

W toku działalności naukowej nawiązałem aktywną współpracę z naukowcami z dwóch ośrodków naukowych. Efektem tej współpracy są między innymi: grant naukowy [II.9.4] i dwa artykuły [8] i [10] opracowane wspólnie z prof. St. Pirógiem (Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie), wykazane w liście publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe. Grant naukowy, w którym byłem głównym wykonawcą, realizowany był przez Politechnikę Rzeszowską, Akademię Górniczo-Hutniczą w Krakowie oraz Politechnikę Warszawską. Aktywnie współpracuję również z naukowcami z Uniwersytetu Rzeszowskiego, czego rezultatem jest 13 wspólnych publikacji w czasopismach lub jako rozdziały w monografiach (pozycje: II.2.24, II.2.25, II.2.26, II.2.27, II.4.24, II.4.25, II.4.27, II.4.28, II.4.29, II.4.30, II.4.31, II.4.32, II.4.33). W ramach podjętej współpracy z Uniwersytetem Rzeszowskim recenzowałem także artykuły naukowe publikowane w czasopiśmie „Edukacja – Technika – Informatyka” (ISSN: 2080-9069), Wydawnictwo Uniwersytetu Rzeszowskiego.

W moim przekonaniu przedstawiona współpraca wyczerpuje wymagania, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 3 ustawy.

6. INFORMACJA O OSIĄGNIĘCIACH DYDAKTYCZNYCH, ORGANIZACYJNYCH ORAZ POPULARYZUJĄCYCH NAUKĘ LUB SZTUKE

W toku pracy dydaktycznej prowadziłem zajęcia dydaktyczne w formie wykładów, laboratoriów pomiarowych i symulacyjnych, projektów indywidualnych oraz warsztatów. Prowadziłem także specjalistyczne kursy dydaktyczne przeznaczone dla studentów oraz opracowałem treści kształcenia dla prowadzonych wykładów.

6.1 W latach 2004 - 2022 prowadziłem autorskie wykłady z przedmiotów oraz zajęcia laboratoryjne i projektowe:

- *Układy programowalne*, studia II stopnia, kierunek elektrotechnika: wykład i laboratoria,
- *Mikrokontrolery i układy programowalne*, studia II stopnia, kierunek elektrotechnika: wykład i laboratoria,
- *Technika cyfrowa*, studia I stopnia, kierunek elektrotechnika: wykład i laboratoria,
- *Metody wspomagania decyzji w energetyce*, studia I stopnia, kierunek energetyka: wykład i projekt,
- *Logiczne sterowanie procesami energetycznymi*, studia II stopnia, kierunek energetyka, elektrotechnika: wykład i laboratoria,
- *Układy sterowania w energoelektronice*, studia I stopnia, kierunek elektrotechnika: wykład i laboratoria,
- *Automatyzacja procesów przetwarzania energii*, studia I stopnia, kierunek fizyka techniczna: wykład i laboratoria,
- *Cyfrowe sterowanie układów energoelektronicznych*, studia II stopnia, kierunek elektrotechnika: wykład i laboratoria,
- *Układy logiki programowalnej w energoelektronice*, studia III stopnia, kierunek elektrotechnika: wykład,
- *Energoelektroniczne elementy automatyki i robotyki*, studia I stopnia, kierunek automatyka i robotyka: wykład.

6.2 Jestem współautorem materiałów pomocniczych do przedmiotów *Podstawy energoelektroniki* oraz *Elektrotermia*:

- *Podstawy energoelektroniki* (ISBN: 83-7199-057-X),

- *Elektrotermia: laboratorium* (ISBN: 8371992564).
- 6.3 Opracowałem dwa zwarte materiały pomocnicze wydane w roku 2014 w ramach projektu UDA-POKL-04.01.02-00-098/12-00:
- *Warsztaty z projektowania układów logicznych w FPGA,*
 - *Projektowanie układów sterowania urządzeń przetwarzających energię elektryczną.*
- 6.4 W ramach projektu „Kształcenie innowacyjnych kadr GOW w Politechnice Rzeszowskiej”, umowa nr UDA-POKL.04.03.00-00-036/12-00, zadanie 1, poz.3, opracowałem treści kształcenia w języku angielskim dla studiów doktoranckich na kierunku „elektrotechnika” dla przedmiotu: *Układy logiki programowalnej w energoelektronice.*
- 6.5 Brałem udział w promocji Wydziału Elektrotechniki i Informatyki PRz podczas Salonu Maturzystów 2017 i Dni Otwartych PRZ (20-21 września 2017) oraz w 2 wyjazdach promujących uczelnię do szkół średnich
- 6.6 Opiekowałem się doktorantem kierunku Informatyka podczas asystowania w zajęciach dydaktycznych z przedmiotu *Mikrokontrolery i układy programowalne.*
- 6.7 Opiekowałem się stażystą z Politechniki Opolskiej. Staż studencki studenta kierunku *informatyka* w zakresie funkcjonowania Laboratorium Układów Programowalnych. Porozumienie WEAiI Politechniki Opolskiej z Katedrą Energoelektroniki i Elektroenergetyki PRz z dnia 6 września 2018 roku.
- 6.8 Prowadziłem dodatkowe zajęcia dla studentów:
- *Zajęcia warsztatowe z projektowania układów logicznych w FPGA* dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki, 25.03.2019 – 30.06.2019 r.
 - *Wykorzystanie układów FPGA w układach cyfrowych,* 2014 r.
 - *Kurs: projektowanie układów sterowania urządzeń przetwarzających energię,* kierunek energetyka, 2013 r. i 2015 r.
 - *Inteligentny dom – systemy automatyki zarządzania energią cieplną,* kierunek energetyka, 2013 r.

- *Zajęcia dodatkowe z fizyki*, studenci pierwszych roczników Wydziału Elektrotechniki i Informatyki, 2012 r.
 - *Wykorzystanie FPGA w układach cyfrowych*, dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki, 2015 r.
 - *Warsztaty z projektowania układów logicznych w FPGA*, dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki, 2014 r.
- 6.9 Byłem opiekunem roku dla studentów kierunku *energetyka* od 2018 do 2020 r. (na podstawie powołania Dziekana WEiI PRZ).
- 6.10 Byłem sekretarzem *Wydziałowej Komisji Rekrutacyjnej* (kierunek elektrotechnika) w latach 1998-2002.
- 6.11 Byłem i jestem członkiem zespołów wydziałowych do spraw związanych z korektą programów studiów dla kierunków elektrotechnika, energetyka, elektroenergetyka, automatyka i robotyka.
- 6.12 Jestem członkiem zespołu do opracowania studiów w języku angielskim na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej, od 2018 r.
- 6.13 Współorganizowałem wykład pracownika firmy Rafako dla studentów kierunku elektrotechnika PRZ (2017 r.) oraz zorganizowałem wycieczkę do ICN Polfa Rzeszów S.A. (maj 2014 r.) w ramach modułu *Logiczne sterowanie przepływem energii* (maj 2014 r.) i wykład pracownika ICN Polfa (czerwiec 2014 r.) dla studentów II stopnia kierunku *energetyka*.
- 6.14 Jestem członkiem:
- *Wydziałowej Komisji ds. Zapewnienia Jakości Kształcenia*
 - *Wydziałowej Komisji ds. Rozwoju i Współpracy z Gospodarką*
- 6.15 Prowadziłem zajęcia w języku angielskim dla studentów programu Erasmus+ (wg obsada.prz.edu.pl):
- *Control systems in power electronics 2020/21*
 - *Control systems in power plants 2020/21*

- *Microcontrollers and programmable units, 2019/20*
- *Engineering project, 2019/20*
- *Control systems in power electronics, 2019/20*

6.16 Otrzymałem nagrody i odznaczenia:

- Indywidualna nagroda Rektora PRz za uzyskanie stopnia naukowego: 2005 r.
- Zespołowa nagroda Rektora PRz za cykl publikacji I stopnia: 2012 r.
- Zespołowa nagroda Rektora PRz za osiągnięcia naukowe III stopnia: 2016 rok
- Zespołowa nagroda Rektora PRz za osiągnięcia naukowe II stopnia: 2017 rok
- Indywidualna nagroda Rektora PRz za uzyskanie patentu: 2019 rok
- Indywidualna nagroda Rektora za autorstwo publikacji: 2021 rok
- Medal Srebrny za Długoletnią Służbę Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej: 13 kwietnia 2021 rok

6.17 W latach 2004 – 2022 byłem promotorem:

- 53 prac magisterskich,
- 52 prac inżynierskich.

6.18 Opracowałem ćwiczenia i uruchomiłem laboratoria dla studentów z przedmiotów:

- *Układy sterowania w energoelektronice* – laboratorium zjawiskowe
- *Układy programowalne* – laboratorium zjawiskowe
- *Urządzenia elektryczne w systemach komputerowych* – laboratorium zjawiskowe
- *Logiczne sterowanie procesami energetycznymi* – laboratorium zjawiskowe
- *Technika cyfrowa* – laboratorium komputerowe
- *Cyfrowe sterowanie układami energoelektronicznymi* – laboratorium komputerowe

7. INNE INFORMACJE, WAŻNE Z PUNKTU WIDZENIA WNIOSKODAWCY A DOTYCZĄCE JEGO KARIERY ZAWODOWEJ

Jestem również autorem lub współautorem publikacji naukowych z zakresu:

- zagadnień sterowania napędów, w tym wysokoobrotowych napędów stosowanych w elektronarzędziach i sprzęcie AGD (3 publikacje w monografiach pokonferencyjnych, 11 publikacji w czasopismach),
- wykorzystaniu logiki rozmytej w zagadnieniach sterowania przekształtnikami energii (8 publikacji w monografiach pokonferencyjnych, 3 publikacje w czasopismach),
- przekształtników matrycowych (8 publikacji w monografiach pokonferencyjnych, 1 publikacja w czasopiśmie),
- wykorzystania narzędzi informatycznych w technice i dydaktyce (4 publikacje w monografiach pokonferencyjnych, 6 publikacji w czasopismach).

W ramach aktywności zawodowej byłem inicjatorem i organizatorem naukowo-badawczego *Laboratorium Układów Sterowania w Energoelektronice* funkcjonującego w Katedrze Energoelektroniki i Elektroenergetyki Politechniki Rzeszowskiej oraz opracowałem i wykonałem stanowisko do badań układów aktywnej redukcji odkształceń prądów z wykorzystaniem logiki rozmytej, sfinansowane z projektu *Rozbudowa infrastruktury naukowo-badawczej PRZ* w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej, Działanie 1.3.

Jestem także członkiem Tematycznej Rady Naukowej czasopisma *Electronics* oraz Rady Recenzentów czasopisma *Energies* wydawnictwa MDPI.

Odbyłem trzy staże w przemyśle w obszarze tematycznym związanym z moją aktywnością naukową (Zapel S.A. w Boguchwale, ICN Polfa Rzeszów S.A. w Rzeszowie, URBE w Sędziszowie Małopolskim) oraz jeden staż w Berlinie w naukowych instytucjach zagranicznych (Uniwersytet Humboldta, Centrum Innowacji, Inkubator Naukowo-Technologiczny).

Ponadto nawiązałem współpracę z *Faculty of Electrical Engineering and Informatics, Technical University of Košice* (Słowacja). W ramach tej współpracy zostałem zaproszony do wygłoszenia cyklu wykładów naukowych oraz brałem udział w badaniach laboratoryjnych i zajęciach prowadzonych dla studentów.

- Wykład pt. *The Space Vector Correction in 3P3W Voltage Inverter*, 3-8 maja 2015 r., Košice, Slovakia (8 godzin)

- Wykład pt. *Higher Harmonics Limitation in the VS Inverter*. 2-8.05.2016 r., Košice, Slovakia (**8** godzin)
- Wykład pt. *The modulation strategy of VSI in case of load asymmetry*. 18-23.02.2018 r., Košice, Slovakia (**8** godzin)
- Wykład pt. *Grid synchronization methods for one-phase systems*. 29.04.2018-5.05.2018r., Košice, Slovakia (**8** godzin)
- Wykład pt. *Integrated Three-Port DC-DC Converters with Reduced Switches for Low-Cost Applications*. 29.04.2019-3.05.2019 r., Košice, Slovakia (**8** godzin)
- Wykład pt. *Control strategies of grid tied converter*. 02.05.2022-06.05.2022 r. Košice, Slovakia (**8** godzin)

Podsumowanie całości dorobku publikacyjnego:

- Sumaryczny *Impact Factor* (IF) całości mojego dorobku publikacyjnego wynosi **12,992**
- Łączna suma punktów MEiN wszystkich moich prac wynosi **897,794**

	Liczba prac	Liczba cytowań	Liczba cytowań bez samocytowań	Indeks Hirscha
Web of Science	18	33	26	4
Scopus	20	46	33	4
Google Scholar	57	85	56	5

.....*Tomáš Dinkovský*.....

(podpis wnioskodawcy)