

Michał Krystkowiak

Politechnika Poznańska

Wydział Elektryczny

Załącznik nr 2

**Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć
naukowych**

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko

Michał Krystkowiak

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne - z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytuł rozprawy doktorskiej

Magister inżynier, Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny, kierunek: elektrotechnika, specjalność: energoelektronika, data ukończenia studiów: 27.06.2001r. (studia ukończone z wyróżnieniem).

Studia doktoranckie, Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny, data ukończenia (uzyskania dyplomu): 24.06.2005r.

Stopień doktora nauk technicznych, dziedzina: nauki techniczne, dyscyplina naukowa: elektrotechnika, stopień nadany uchwałą Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej w dniu 01.09.2009r. na podstawie rozprawy doktorskiej, pt.: „*Układ prostownikowy mocy o polepszonych wskaźnikach z energoelektronicznym modulatorem prądu*”, Politechnika Poznańska 2009.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych

Od 01.10.2001r. zatrudniony na stanowisku asystenta w Instytucie Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej.

Od 01.10.2009r. zatrudniony na stanowisku adiunkta w Zakładzie Energoelektroniki i Sterowania w Instytucie Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej.

Od 22.11.2018r. zatrudniony na stanowisku starszego wykładowcy z doktoratem w Zakładzie Energoelektroniki i Sterowania w Instytucie Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej.

4. Wskazane osiągnięcia wynikające 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. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):

a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

Cykl powiązanych tematycznie publikacji pod wspólną nazwą: „*Modulacja prądów w układach energoelektronicznych*” - cykl zawiera 12 publikacji.

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

- [1] Krystkowiak M., Gwóźdź M., *Control system of power electronics current modulator utilized in diode rectifier with sinusoidal power grid current*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 85, nr7, s. 138-140, 2009.
Punkty MNiSW = 6, IF = 0.196, mój udział procentowy szacuję na: 45%.
- [2] Krystkowiak M., *Realizacja modelu symulacyjnego układu prostownikowego z modulacją prądów w obwodzie wyjściowym*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 86, nr 12, s. 230-234, 2010.
(Punkty MNiSW = 9, IF = 0.242)
- [3] Gwóźdź M., Krystkowiak M., *Energoelektroniczne szerokopasmowe źródła napięcia i prądu*, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 87, nr 11, s. 37-40, 2011.
Punkty MNiSW = 9, IF = 0.244, mój udział procentowy szacuję na: 30%.
- [4] Krystkowiak M., Gwóźdź M., *Simulation and experimental models of 3-phase diode rectifier with current modulation in DC Circuit*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 87, nr 1, s. 75-79, 2011.
Punkty MNiSW = 9, IF = 0.244, mój udział procentowy szacuję na: 60%.
- [5] Krystkowiak M., *Przekształcanie energii elektrycznej w układach prostownikowych mocy z modulacją prądu*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 88, nr 10A, s.22-25, 2012.
(Punkty MNiSW = 15)
- [6] Krystkowiak M., *Zmodyfikowany model szerokopasmowego energoelektronicznego sterowanego źródła prądowego z modulacją prądu wyjściowego*, Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania, Vol. 57, nr 11, s. 65-70, 2016.
(Punkty MNiSW = 8)

- [7] Krystkowiak M., Gwóźdź M., *Three-phase diode rectifier with current modulator in DC circuit based on multi-channel converter*, Archives of Electrical Engineering, Vol. 66, Iss. 3, pp. 533-546, DOI: 10.1515/aee-2017-0034, 2017.
Punkty MNiSW = 15, mój udział procentowy szacuję na: 53%.
- [8] Gwóźdź M., Krystkowiak M., Jędryczka C., Gulczyński A., Matecki D., *Generator with modulated magnetic flux for wind turbines*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences, Vol. 65, No 4, pp. 469-478, 2017.
Punkty MNiSW = 25, IF = 1.361, mój udział procentowy szacuję na: 32%.
- [9] Krystkowiak M., *Modified structure of power rectifier with current modulation and regulated output DC voltage*, Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE 2017), pp. 1- 5, 2017.
(Punkty MNiSW = 15, mat. konf. indeks. w WoS)
- [10] Krystkowiak M., Gulczyński A., *AC/DC/AC Converter with Power Electronics Current Modulator Used in DC Circuit for Renewable Energy Systems*, In: Kabziński J. (eds) Advanced Control of Electrical Drives and Power Electronic Converters, Studies in Systems, Decision and Control, 2017, vol 75. 2017, ss.278.
Punkty MNiSW = 5, mój udział procentowy szacuję na: 80%.
- [11] Jędryczka C., Szelaż W., Gwóźdź M., Krystkowiak M., *Analysis of electromagnetic phenomena in modulated flux synchronous generator*, Compel-The International Journal For Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 37, Iss.5, pp. 1862-1869, 2018.
Punkty MNiSW = 15, IF = 0.534, mój udział procentowy szacuję na: 20%.
- [12] Krystkowiak M., Gwóźdź M., *Energy Conversion System for Wind and Water Turbines Based on Generator with Modulated Magnetic Flux*, Proceedings of Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE 2018), 2018.
Punkty MNiSW = 15, mat. konf. indeks. w WoS, mój udział procentowy szacuję na: 53%.

c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Wprowadzenie

Przedstawiony cykl powiązanych tematycznie publikacji naukowych obejmuje wyniki badań z zakresu modulacji prądów w układach energoelektronicznych. Habilitant wykorzystując tą technikę poprawił jakość przekształcania energii elektrycznej oraz zwiększył efektywność działania w następujących rozpatrywanych systemach, będących przedmiotem jego badań:

- prostownikowych układach dedykowanych przede wszystkim dla dużych mocy,
- sterowanych źródłach prądowych oraz układach aktywnej kompensacji równoległej,
- autorskim systemie energoelektronicznym opracowanym z myślą o modulacji przebiegu strumienia magnetycznego w niekonwencjonalnym prototypie generatora synchronicznego z magnesami trwałymi typu PMSG.

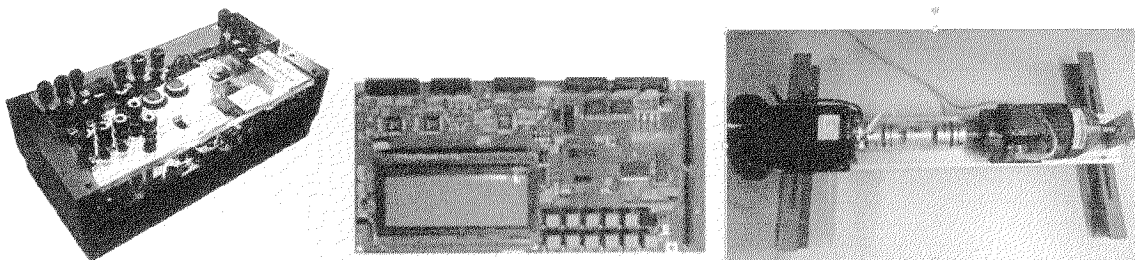
Główne cele naukowe podjęte przez Autora w trakcie prowadzonych prac badawczych, które zaprezentowano w cyklu publikacyjnym pt.: „Modulacja prądów w układach energoelektronicznych” sformułowano w sposób następujący, a mianowicie:

- minimalizacja odkształceń wypadkowych prądów fazowych sieci układów prostownikowych z modulacją prądu w obwodzie stałoprądowym,
- popieszenie wybranych wskaźników jakości przekształcania energii oraz zwiększenie stopnia niezawodności i uniwersalności w układach prostownikowych z modulatorem prądu m.in. poprzez zastosowanie trybu wielokanałowego,
- zwiększenie pasma przenoszenia sygnałów energoelektronicznych sterowanych źródeł prądowych oraz układów aktywnej kompensacji równoległej,
- opracowanie koncepcji i struktury generatora energii elektrycznej charakteryzującego się wysokim stopniem niezawodności oraz wysoką sprawnością energetyczną,
- opracowanie autorskiego systemu przekształtnikowego o możliwie prostej budowie części silnoprądowej i wysokiej sprawności z myślą o współpracy z niekonwencjonalnym generatorem synchronicznym PMSG, tj. systemu umożliwiającego zwrot energii do sieci.

Opisane w osiągnięciu naukowym pozycje literaturowe dotyczyły zarówno opracować struktur silnoprądowych, jak i algorytmów sterowania rozpatrywanych systemów. Równoległe z badaniami symulacyjnymi, Habilitant prowadził badania eksperymentalne bazując na podzespołach zaprezentowanych w dalszej części autoreferatu.

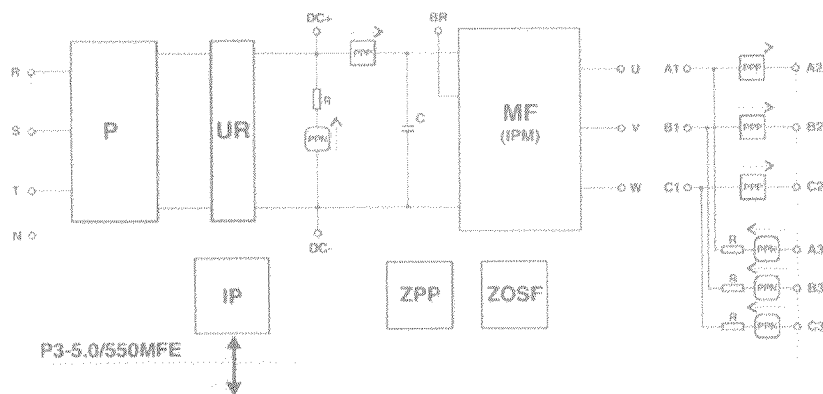
Stanowisko do badań eksperymentalnych

Celem weryfikacji własnych technik modulacji prądów w rozważanych układach energoelektronicznych, będących przedmiotem badań Autora wniosku, zbudował on stanowiska eksperymentalne wykorzystując m.in. uniwersalne moduły przekształtnikowe P3-5.0/550MFE LABINVERTER (po dokonaniu niezbędnych modyfikacji), cyfrowy system uruchomieniowy ALS-G3-1369 oraz stanowisko maszynowe z generatorem typu PMSG sprzężonym mechanicznie z indukcyjnym silnikiem napędowym (rys.1).



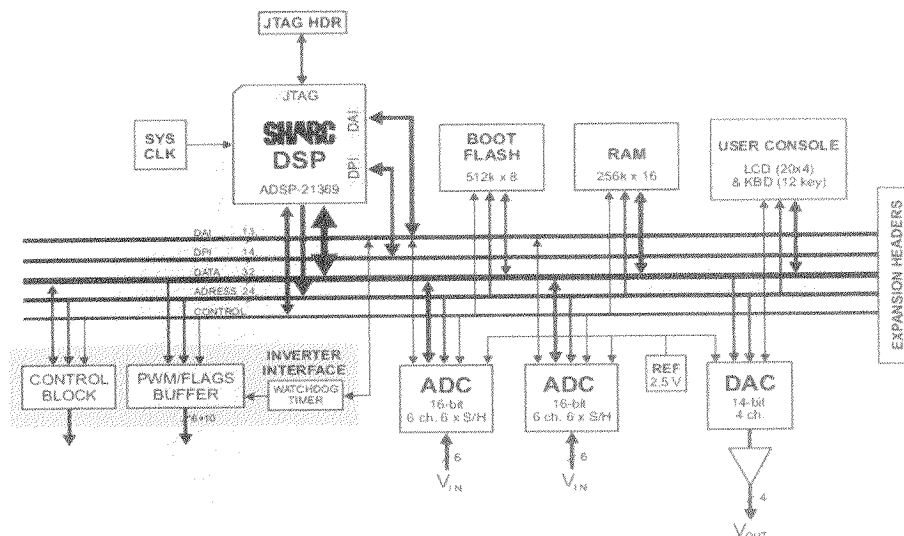
Rys.1 . Wybrane podzespoły przykładowego stanowiska laboratoryjnego (kolejno od lewej strony: przekształtnik P3-5.0/550MFE LABINVERTER, system ALS-G3-1369, układ maszynowy)

Część silnopiętowa przekształtników bazowała na falownikach napięcia P3-5.0/550MFE LABINVERTER charakteryzujących się możliwością rekonfiguracji połączeń zarówno toru pomiarowego, jak i wykonawczego, zapewniając tym samym dużą swobodę użytkownikowi końcowemu. Schemat blokowy urządzenia zaprezentowano na rys. 2. Układ ten bazuje na dwóch głównych modułach energoelektronicznych: 3-fazowym zintegrowanym prostowniku diodowym (P) oraz 3-fazowym inteligentnym module mocy z zaworami IGBT typu PM50RSA120 firmy Mitsubishi, który jest częścią składową modułu falownika napięcia (MF). Opisany system wyposażono w dwa interfejsy: cyfrowy oraz analogowy stanowiące łącznie interfejs przekształtnika (IP), którego zadaniem jest: blokowanie zewnętrznych sygnałów sterujących zaworami w przypadku wystąpienia stanów awaryjnych, wprowadzanie i wyprowadzanie dodatkowych sygnałów sterujących oraz diagnostycznych, wyprowadzanie sygnałów prądowych z przetworników pomiarowych prądu i napięcia (bloki PPP oraz PPN). W wybranych aplikacjach, np. w trybie tzw. pracy wielokanałowej modulatora prądu, ze względu na stopień złożoności proponowanych rozwiązań, konieczne było wykorzystanie kilku przekształtników współpracujących ze sobą.



Rys. 2. Schemat blokowy przekształtnika P3-5.0/550MFE LABINVERTER

Opracowane autorskie algorytmy sterowania implementowano w cyfrowym systemie uruchomieniowym ALS-G3-1369, którego schemat blokowy zaprezentowano na rys. 3. Bazuje on na zmiennoprzecinkowym procesorze sygnałowym rodziny SHARC 3 – generacji typu ADSP-21369 (800 MIPS, 2400 MFLOPS, 2Mb SRAM) firmy Analog Devices.



Rys. 3. Schemat blokowy systemu uruchomieniowego ALS-G3-1369

Modulacja prądów w układach prostownikowych mocy

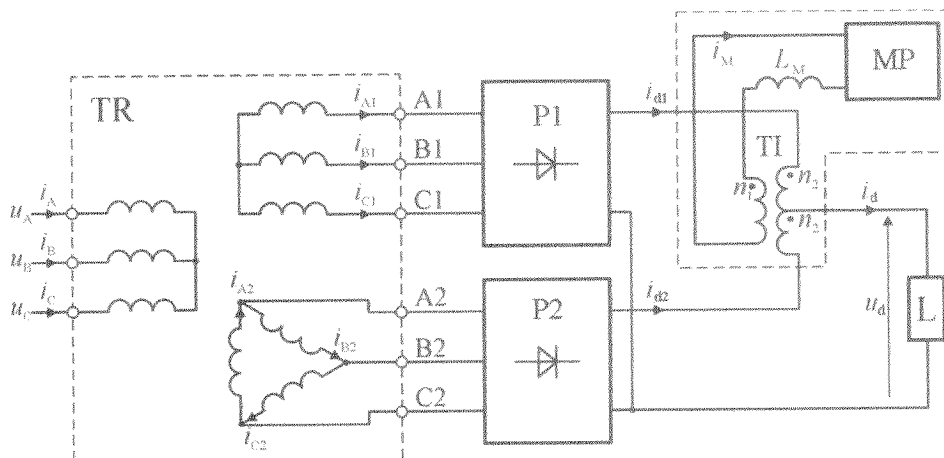
Szczególnie aktualnym problemem współczesnej elektroenergetyki, jak i energoelektroniki jest polepszenie ogólnie rozumianej jakości przekształcania energii. Stosuje się wybrane wskaźniki energetyczne umożliwiające, m.in. określenie odkształcenia prądów sieciowych, współczynnika mocy, czy też sprawności. Bardzo ważnym aspektem jest zapewnienie wysokiego stopnia niezawodności, przy jednoczesnym ograniczeniu nakładów

inwestycyjnych. Problematyka ta jest bardzo aktualna, m.in. w przypadku powszechnie stosowanych układów prostownikowych dużych i najwyższych mocy. Układy te znalazły i nadal znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach gospodarki. Można je spotkać, np. w: trakcji elektrycznej, hutnictwie, górnictwie, jak i w systemach współpracujących z tzw. odnawialnymi źródłami energii (OZE).

Powszechnie znanym i wykorzystywanym sposobem poprawy wartości wskaźników energetycznych prostowników mocy jest zwiększanie liczby pulsów napięcia wyjściowego. Uzyskuje się to przez odpowiednie (szeregowe lub równoległe) łączenie obwodów energetycznych prostowników składowych. Pomimo tych zabiegów, niestety nadal charakteryzują się one znacznym odkształceniem prądu linii, co może być niedopuszczalne ze względu na warunki pracy innych odbiorców zasilanych z tej sieci. Kolejnym sposobem umożliwiającym polepszenie jakości przekształcanej energii w układach prostownikowych mocy jest stosowanie filtrów pasywnych, jak i kompensatorów aktywnych oraz układów hybrydowych będących połączeniem obu tych koncepcji. Rozwiązania te wyraźnie zwiększają jednak stopień komplikacji obwodów elektrycznych, co przyczynia się tym samym do zwiększenia kosztów inwestycji. Inną metodą ograniczania niekorzystnego oddziaływania układów na sieć jest wykorzystanie modulacji szerokości impulsów MSI (z j. ang. PWM) w głównym obwodzie zasilania prostowników. Przekształtniki takie wymagają stosowania kluczy w pełni sterowalnych przełączanych z częstotliwością wielokrotnie większą od częstotliwości podstawowej harmoniczej napięcia sieci, przy czym moc prostownika jest porównywalna z mocą odbiornika. Rozwiązanie to przyczynia się m.in. do zwiększenia zaburzeń przenoszonych drogą radiową, jak i zmniejszenia współczynnika sprawności układu.

Poza zaprezentowanymi wyżej metodami, istnieje możliwość znacznego ograniczenia niekorzystnego oddziaływania opisywanych przekształtników na sieć poprzez zastosowanie modulacji prądów w obwodzie prądu stałego prostowników. W swojej pracy naukowej to tym obszarem badawczym w pierwszej kolejności zajął się Autor wniosku. Wyniki swoich badań w tym zakresie przedstawił w pracach [1, 2, 4, 5]. Na rys. 4 przedstawiono schemat ideowy układu trójfazowego prostownika diodowego, w którym Habilitant zastosował modulację prądów wyjściowych obu mostków składowych (połączonych równoległe) za pomocą modulatora prądu (MP). Diodowe mostki prostownicze (P_1) i (P_2) zasilane są z transformatora energetycznego (TR) o grupie połączeń Yyd w celu zapewnienia przesunięcia fazowego napięć zasilających strony wtórnej o kąt $\frac{\pi}{6}$. Po stronie stałoprądowej mostki połączone są za

pomocą transformatora impulsowego (TI) z dodatkowym uzwojeniem charakteryzującym się szerokim pasmem przenoszenia sygnału, w którego obwód – po stronie pierwotnej – włączony jest energetyczny modulator prądu MP pracujący, jako energoelektroniczne sterowane źródło prądowe.



Rys. 4. Schemat ideowy obwodu silnoprądowego układu prostownika diodowego z modulatorem prądu MP

Za pośrednictwem transformatora impulsowego TI przemienny prąd modulatora jest odpowiednio dodawany (ze znakiem „+” lub „-”) do prądów wyjściowych każdego z prostowników składowych. W konsekwencji możliwe staje się kształtowanie (modulowanie) prądów wejściowych mostków składowych, a zatem i wypadkowego prądu sieci.

Jednym z celów, do osiągnięcia których dążył Autor wniosku, było określenie sygnału referencyjnego modulatora prądu umożliwiającego uzyskanie wypadkowych prądów sieci pobieranych przez układ prostownikowy charakteryzujących się możliwie niską zawartością wyższych harmonicznych. W wyniku przeprowadzonych badań Habilitant zaproponował autorski opis sygnału referencyjnego modułu MP wyrażony poniższą zależnością [12]:

$$i_{Mref}(t) = \frac{I_d}{2N} \frac{2\sqrt{3} I_d \sin(\omega_b t) - (i_{A1}(t) + \sqrt{3}i_{A2}(t))}{i_{A1}(t) - \sqrt{3}i_{A2}(t)} \quad (1)$$

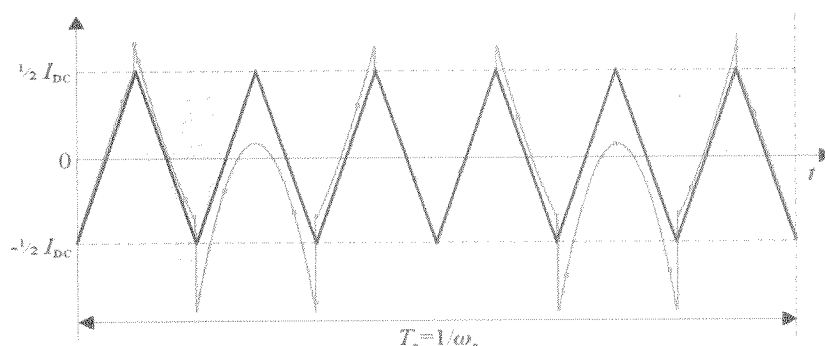
gdzie: i_{Mref} - prąd referencyjny modulatora prądu, i_{A1} , i_{A2} - prądy fazowe uzwojeń wtórnych transformatorów energetycznych o grupach połączeń odpowiednio: gwiazda i trójkąt, N - przekładnia transformatora impulsowego.

Rozwiązanie to znajduje zastosowanie w przypadku minimalizacji odkształceń prądów sieciowych jednej z wybranych faz zasilających układ prostownikowy. Należy zauważyć, że teoretyczna wartość współczynnika THD prądu sieci wynosi w tym przypadku 0%. Przy konieczności poprawy jakości prądów zasilających trzech faz (przypadek najczęściej rozpatrywany) wymagane jest zapewnienie sygnału modulatora prądu charakteryzującego się jednakowym przesunięciem fazowym względem podstawowych harmonicznych napięć sieciowych poszczególnych faz. Uzyskanie takiego efektu w rozpatrywanym rozwiązaniu jest jednak niemożliwe, ze względu na jednoczesne oddziaływanie na kształtowane prądy wejściowe prostowników diodowych P1 i P2 (a zatem i wypadkowe prądy sieciowe) tego samego sygnału generowanego przez modulator MP, który może być synchronizowany tylko z jednym sygnałem (podstawową harmoniczną napięcia sieciowego jednej z wybranych faz).

W większości dalszych rozważań, Habilitant sygnał opisany wzorem (1) zastąpił przebiegiem trójkątnym o częstotliwości 6-krotnie większej od częstotliwości podstawowej harmonicznej napięć sieciowych (zależność nr 2) - zakładając tym samym poprawę jakości prądów sieciowych wszystkich rozpatrywanych faz sieci zasilającej. Na podkreślenie zasługuje fakt, że teoretyczna wartość współczynnika THD prądów sieci w tym przypadku nie przekraczała 1-2%.

$$i_{\text{Mref}}(t) = \frac{4}{\pi} I_{\text{DC}} \left[\frac{\sin(16\omega_g t)}{1^2} - \frac{\sin(36\omega_g t)}{3^2} + \frac{\sin(56\omega_g t)}{5^2} - \dots \right] \frac{1}{N} \quad (2)$$

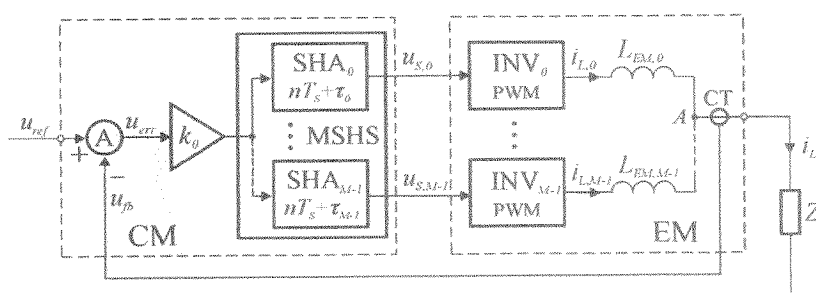
Na rys. 5 zaprezentowano sygnały referencyjne modulatora prądu opisane wzorami, odpowiednio (1) oraz (2) [12].



Rys. 5. Przebiegi wyznaczonych sygnałów referencyjnych modulatora prądu MP opisane wzorami nr 1 (kolor czerwony) oraz nr 2 (kolor czarny)

Należy zaznaczyć, że także w przypadku założonego trójkątnego sygnału modulatora prądu, możliwa jest dalsza minimalizacja odkształceń prądów pobieranych z sieci. Wymaga to jednak zastosowania dodatkowego sterowanego źródła prądowego połączonego równolegle z odbiornikiem, zwiększając tym samym stopień komplikacji obwodu.

Początkowo energoelektroniczny modulator prądu MP Autor zbudował, w podstawowej wersji, na bazie konwencjonalnego tranzystorowego mostka typu H z wyjściowym filtrem dolnoprzepustowym w postaci dławika. Funkcjonuje on jako falownik napięcia pracujący w regulacji nadążnej prądu, pełniąc tym samym rolę sterowanego źródła prądowego [3]. W celu umożliwienia uzyskania prądów sieciowych bardzo dobrze zbliżonych do sygnałów sinusoidalnych, konieczne jest zapewnienie możliwie wiernego odwzorowania sygnału referencyjnego w sygnale wyjściowym modulatora MP. W konsekwencji Habilitant zaproponował modyfikację struktury silnopiędowej modulatora prądu, wykorzystując tzw. tryb pracy wielokanałowej [3, 7] uzyskując tym samym zwiększenie efektywności całego systemu. Na rys. 6 zaprezentowano ideowy schemat blokowy sterowanego źródła prądowego pełniącego funkcję modulatora prądu w wersji wielokanałowej (pominięto w tym przypadku impulsowy transformator sprzęgający TI). Całkowity prąd wyjściowy i_L jest równy sumie składowych prądów, odpowiednio: $i_{L,i}$, gdzie $i=0,1,\dots,M-1$ są indywidualnymi sygnałami w danej gałęzi przekształtnika.



Rys. 6. Ideowy schemat blokowy sterowanego źródła prądowego w wersji wielokanałowej

Zaprezentowana struktura źródła prądu, pełniącego w rozważanej aplikacji funkcję modulatora prądu, bazuje na dwóch głównych modułach, a mianowicie: na module sterującym (CM) i module wykonawczym (EM).

Moduł sterujący zawiera następujące bloki wewnętrzne:

- sumator (A), generujący sygnał błędu (uchybu),
- regulator prądu wyjściowego ze współczynnikiem wzmocnienia k_0 ,
- wielowymiarowy system (MSHS) składający się z M połączonych równolegle układów

próbkująco-pamiętających.

W skład modułu wykonawczego wchodzi natomiast:

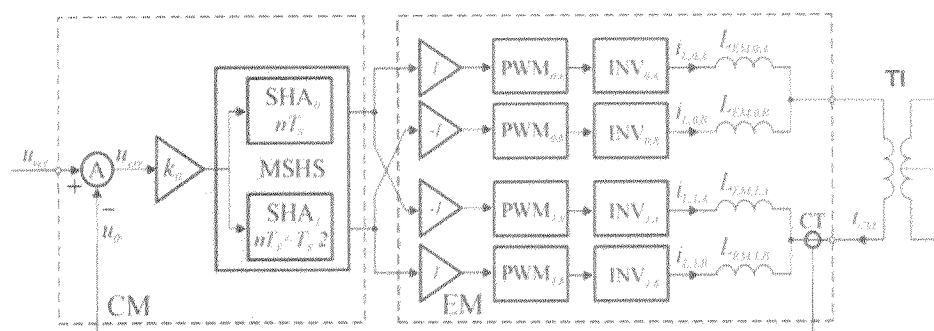
- M połączonych równolegle falowników napięcia o strukturze półmostkowej,
- dolnoprzepustowy wyjściowy filtr indukcyjny (L),
- przetwornik pomiarowy prądu (CT).

Chwile próbkowania oraz sygnały nośne (PWM) dla poszczególnych kanałów przekształtnika są przesunięte wzajemnie względem siebie w czasie o $\frac{T_s}{M}$, gdzie T_s jest okresem próbkowania. W konsekwencji, z punktu widzenia stabilności systemu, korzystnej modyfikacji ulega opis transmitancyjny układu (funkcja przenoszenia). W rezultacie wzmocnienie regulatora, jakie uzyskał Habilitant, w układzie sterowania może zostać zwiększone w porównaniu do klasycznej struktury jednokanałowej przekształtnika, przy jednoczesnym spełnieniu warunku zachowania stabilności układu zamkniętego [7]. Ma to bardzo pozytywny wpływ na efektywność prezentowanego rozwiązania, ponieważ pozwala na zwiększenie stopnia dokładności odwzorowania w sygnale wyjściowym modulatora prądu sygnału referencyjnego, co przekłada się na jakość wypadkowych prądów sieciowych opisywanego układu prostownikowego. Ponadto możliwe jest M -krotne obniżenie częstotliwości impulsowania kluczy w stosunku do wersji jednokanałowej (biorąc pod uwagę m.in. spektrum widmowe wypadkowych prądów sieci), co minimalizuje dodatkowo straty dynamiczne w elementach półprzewodnikowych oraz ułatwia ograniczenie zaburzeń elektromagnetycznych. Również zwiększa się niezawodność proponowanej koncepcji - w przypadku uszkodzenia jednej z gałęzi tranzystorowej możliwa jest kontynuacja modulacji prądów prostownika, np. w trybie jednokanałowym modułu MP ($M = 1$).

Rys. 7 prezentuje schemat blokowy źródła prądowego pełniącego funkcję modulatora prądu sprzężonego poprzez szerokopasmowy transformator impulsowy z obwodem wyjściowym prostowników diodowych. W tym przypadku zastosowano przekształtnik w wersji 2-kanałowej ($M=2$). Wariant ten był przedmiotem dalszych rozważań Habilitanta w ramach prac [3, 7].

W trakcie badań Autor uwzględnił parametry pasożytnicze zarówno sieci zasilającej, transformatorów energetycznych, jak i sprzęgającego transformatora impulsowego oraz kluczy półprzewodnikowych. Na bazie wyników badań własnych oraz dokumentacji technicznych producentów Habilitant zbudował własne modele poszczególnych komponentów, wykorzystując w tym celu m.in. opracowaną metodę identyfikacji parametrów pasożytniczych elementów indukcyjnych. Moc znamionową całego systemu przyjęto na

poziomie 6 kW. Przykładowo dla znamionowego obciążenia układu prostownikowego i częstotliwości impulsowania modulatora prądu w wersji dwukanałowej wynoszącej 10 kHz uzyskano współczynnik THD prądów sieciowych wynoszący około 1,35%. Jakość prądów sieciowych (oceniana jako stopień odwzorowania w pobieranych prądach sieciowych ich harmonicznym podstawowych) w przypadku zastosowania modulatora prądu w wersji dwukanałowej uległa poprawie blisko 20% w stosunku do standardowej wersji jednokanałowej [7]. W konsekwencji zminimalizowano straty mocy m.in. w transformatorach energetycznych układu spowodowane obecnością wyższych harmonicznym w prądach sieciowych, co Autor wniosku uważa za własne osiągnięcie.



Rys. 7. Schemat blokowy modulatora prądu w wersji dwukanałowej ($M=2$)

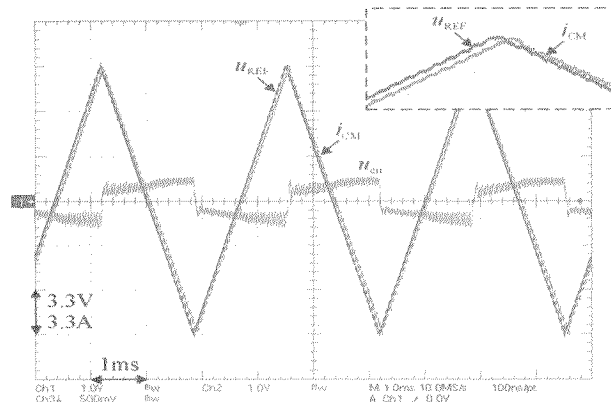
Celem weryfikacji własnych technik modulacji prądów Autor zbudował stanowisko eksperymentalne układu prostownikowego z modulatorem prądu zarówno w wersji jedno-, jak i dwu- kanałowej. Na rys. 8 oraz 9 zaprezentowano wybrane wyniki eksperymentalne (częstotliwość impulsowania kluczy w obu przypadkach wynosiła 10 kHz). Badania przeprowadzono dla warunków obciążenia zmieniających się w zakresie od 10% do 100% wartości znamionowej. Jednym z kryteriów oceny była wartość błędu odwzorowania w sygnale wyjściowym sygnału referencyjnego określona wyrażeniem (3).

$$\varepsilon_{CTR} = \sqrt{\frac{|u_{err}|^2}{|u_{ref}|^2}} 100\% = \sqrt{\frac{|u_{ref} - u_{fb}|^2}{|u_{ref}|^2}} 100\% \quad (3)$$

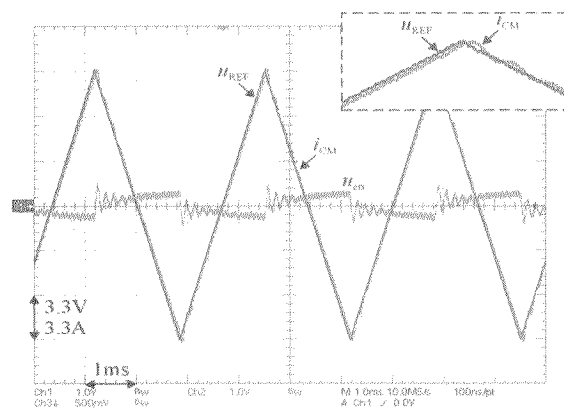
gdzie: u_{ref} - sygnał referencyjny, u_{fb} - sygnał wyjściowy (generowany).

Dla znamionowych warunków pracy Habilitant uzyskał następujące rezultaty: $\varepsilon_{CTR} \cong 9.8\%$ dla modulatora prądu w wersji jednokanałowej ($M=1$) oraz $\varepsilon_{CTR} \cong 5.9\%$ dla modulatora prądu w

wersji dwukanałowej ($M=2$). Wyniki potwierdziły zasadność zastosowania modulatora prądu w wersji wielokanałowej.



Rys. 8. Sygnały dla modulatora prądu w wersji jednokanałowej ($M=1$): referencyjny (niebieski), wyjściowy (czerwony), błędu (zielony)

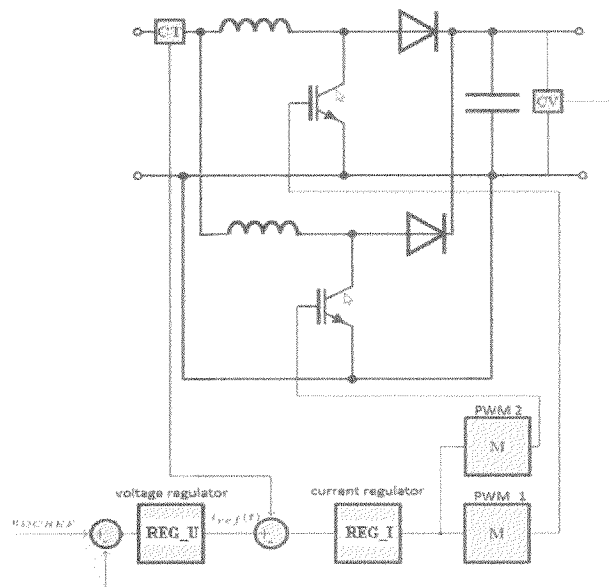


Rys. 9. Sygnały dla modulatora prądu w wersji dwukanałowej ($M=2$): referencyjny (niebieski), wyjściowy (czerwony), błędu (zielony)

Zaletą prezentowanego rozwiązania jest, że wartość mocy samego modulatora prądu MP oraz impulsowego transformatora sprzęgającego TI stanowi zaledwie 2,35% mocy przenoszonej przez system [1, 2]. W konsekwencji rozwiązanie to jest bardzo atrakcyjne dla układów prostownikowych dużych mocy. W tym przypadku straty mocy w obwodzie modulatora prądu są pomijalnie małe. Także stopień niezawodności systemu jest bardzo wysoki. Nawet w przypadku całkowitej dezaktywacji modulatora MP możliwe jest dostarczanie energii do odbiorów (układ zachowuje się w tym przypadku jak klasyczny diodowy prostownik 12-pulsowy). Ponadto należy zauważyć, że zastosowanie modulacji celem poprawy jakości prądów zasilających jest możliwe w już pracujących klasycznych układach prostownikowych mocy połączonych równolegle (np. prostowniki zasilające

miejską sieć trakcyjną). Wiąże się to ze stosunkowo małą ingerencją w dotychczasową instalację, a tym samym z niskimi nakładami finansowymi.

W ramach prowadzonych badań Habilitant zaproponował również autorski sposób regulacji i stabilizacji wartości średniej napięcia wyjściowego rozważanego układu prostownikowego z modulatorem prądu, umożliwiając tym samym zwiększenie jego uniwersalność [9]. W rozwiązaniu tym wykorzystał w wyjściowym torze stałoprądowym dodatkowy przekształtnik impulsowy DC/DC pracujący w trybie wielokanałowym [7]. Od strony zacisków wejściowych pełni on funkcję sterowanego źródła prądowego zapewniając stałość w czasie prądu wyjściowego układu prostownikowego (warunek konieczny, aby zapewnić wysoką efektywność działania modulatora prądu przy założeniu jego trójkątnego sygnału referencyjnego) przy jednoczesnej możliwości stabilizacji i regulacji wartości średniej napięcia wyjściowego całego systemu. Jednoczesne spełnienie tych zadań było możliwe m.in. dzięki zastosowaniu regulacji kaskadowej w torze sterowania, z nadrzędnym regulatorem napięcia i podrzędnym regulatorem prądu (rys. 10).



Rys. 10. Schemat poglądowy przekształtnika DC/DC zastosowany w wyjściowym torze stałoprądowym układu prostownikowego ($M = 2$)

W ramach przeprowadzonych prac badawczych Autor rozważał również wykorzystanie opisywanej struktury prostownika z modulatorem prądu jako stopnia wejściowego energoelektronicznego toru przekształcania energii elektrycznej produkowanej przez konwencjonalne 3-fazowe generatory wykorzystywane w systemach odnawialnych źródeł energii (tzw. OZE). Opracowaną przez Habilitanta strukturę części silnopradowej i sterującej

oraz algorytmy sterowania poszczególnymi modułami systemu zaprezentowano w publikacji [10]. Rozwiązanie to jest bardzo korzystne w przypadku, kiedy wymagana jest separacja galwaniczna między generatorem a modułami przekształtnikowymi. Umożliwia ograniczenie strat mocy w obwodach magnetycznych maszyny elektrycznej, przy zastosowaniu stosunkowo prostego układu elektrycznego (modulatora prądu), na skutek poboru quasi-sinusoidalnych prądów, co z kolei wpływa na poprawę współczynnika sprawności rozpatrywanego systemu konwersji energii.

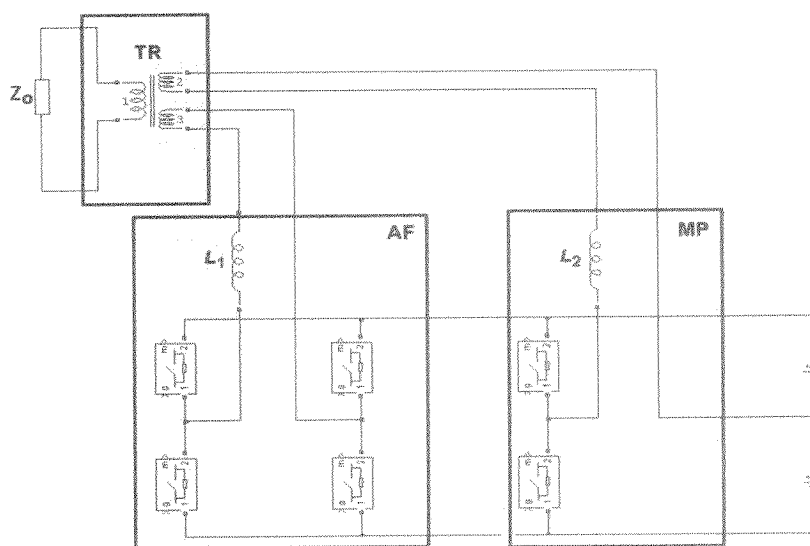
Szerokopasmowe sterowane energoelektroniczne źródła prądowe z modulacją prądu

Kolejnym obszarem badawczym Autora wniosku były sterowane energoelektroniczne źródła prądu. W ramach tych badań opracował i wdrożył strukturę silnoprądową oraz algorytmy sterowania energoelektronicznego sterowanego źródła prądowego o zwiększonym paśmie przenoszenia sygnału. W tym celu Autor wykorzystał dodatkowy moduł stanowiący energoelektroniczny modulator prądu współpracujący z klasyczną strukturą sterowanego energoelektronicznego źródła prądowego [6]. W konsekwencji uzyskał możliwość dokładniejszego odwzorowania w sygnale wyjściowym sygnału referencyjnego o dużej dynamice zmian.

Główny moduł (AF) bazuje na klasycznym jednofazowym tranzystorowym falowniku napięcia z wyjściowym dolnoprzepustowym filtrem indukcyjnym (L_1) (rys. 11). Falownik ten pracuje w zamkniętym układzie regulacji nadążnej prądu, stanowiąc tym samym energoelektroniczne sterowane źródło prądowe. Szerokość pasma przenoszenia modułu AF, a zatem i skuteczność odwzorowania prądu referencyjnego o dużej dynamice zmian, uzależniona jest od wielu czynników. Należą do nich, m.in.: wartość napięcia zasilającego w obwodzie stałoprądowym, wartość indukcyjności filtra wyjściowego, czy też parametry układu sterowania. Konieczność stosowania dławika na wyjściu źródła prądowego jest jedną z ważniejszych przyczyn ograniczenia pasma przenoszenia przekształtnika. Dobór wartości jego indukcyjności podyktowany jest m.in. możliwością ograniczenia w sygnale wyjściowym składowych harmonicznych związanych z częstotliwością impulsowania kluczy.

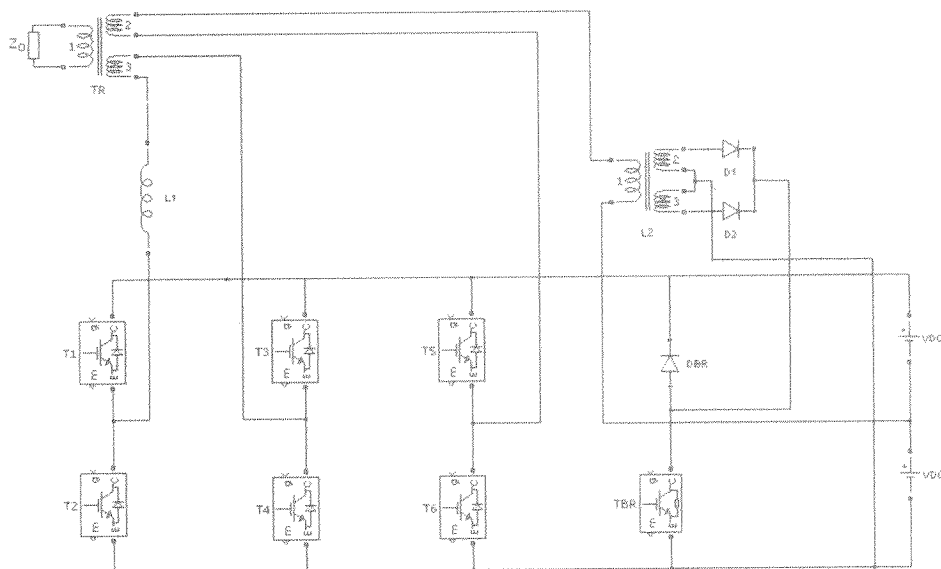
W celu uzyskania lepszych właściwości dynamicznych przekształtnika zastosowano energoelektroniczny modulator prądu MP sprzężony poprzez transformator (TR) (rys. 11). Generowany przez ten układ sygnał umożliwia modulację prądu wyjściowego modułu głównego AF. Analogicznie, jak moduł AF, przekształtnik ten bazuje na falowniku napięcia z dolnoprzepustowym indukcyjnym filtrem wyjściowym, pracującym w regulacji nadążnej prądu. Zastosowany dławik (L_2) ma jednak mniejszą wartość indukcyjności. Spełnienie tego

warunku jest konieczne w celu zwiększenia szerokości pasma przenoszenia (dynamiki) modułu MP. Część silnoprądową modulatora prądu zbudowano na bazie półmostka tranzystorowego. Rozwiązane to jest uzasadnione, ponieważ do realizacji obu modułów wykorzystano jeden trójfazowy mostek tranzystorowy powszechnie dostępny na rynku w postaci zintegrowanego tranzystorowego modułu inteligentnego IPM.



Rys. 11. Schemat ideowy modelu symulacyjnego części silnoprądowej energoelektronicznego źródła prądowego z modulatorem prądu MP

Dążąc do dalszej poprawy właściwości dynamicznych źródła prądowego Habilitant zaproponował zastosowanie przestrajalnego filtra wyjściowego modułu pomocniczego modulatora prądu MP [6]. Filtr ten charakteryzuje się możliwością zmiany wartości indukcyjności w trakcie pracy układu (rys. 12). Składa się on ze sprzężonego dławika (transformatora impulsowego), dodatkowych kluczy (T_{BR}), (D_{BR}) i dwóch diod ($D1$ oraz $D2$). Współczynnik sprzężenia magnetycznego cewek powinien przyjąć w rozpatrywanym przypadku wartość mniejszą od jedności. W przypadku, kiedy wymagana jest duża dynamika modułu modulatora prądu MP następuje załączenie tranzystora T_{BR} , a w konsekwencji zmniejszenie wartości wypadkowej indukcyjności L_2 , co z kolei umożliwia chwilowe zwiększenie pasma przenoszenia przekształtnika. Powoduje to jednak większe oscylacje prądu wyjściowego wokół sygnału referencyjnego (przy założeniu tej samej częstotliwości kluczowania tranzystorów), co stanowi pewną wadę niniejszego rozwiązania. W chwili wyłączenia tranzystora energia zgromadzona w polu magnetycznym dławika poprzez diodę D_{BR} zostaje przekazana do obwodu stałoprądowego DC.



Rys. 12. Schemat ideowy modelu symulacyjnego części silnoprądowej energoelektronicznego szerokopasmowego źródła prądowego z modulatorem prądu MP o przestrajalnym filtrze wyjściowym

Autor wniosku opracował również algorytmy sterowania poszczególnymi modułami dla zaproponowanej struktury szerokopasmowego źródła prądowego [6]. Kolejność ich aktywowania uzależniona jest od dynamiki sygnału referencyjnego. W zależności od mierzonej wartości bezwzględnej uchybu przekształtnika głównego AF e_{AF} zastosowany w układzie sterowania blok decyzyjny aktywuje kolejno:

- tylko moduł AF,
- moduły AF oraz modulatora prądu MP, kiedy spełniony jest warunek opisany nierównością:

$$|e_{AF}| \geq A, \quad (4)$$

- moduły AF oraz modulatora prądu MP ze zmniejszoną wartością indukcyjności jego filtra wyjściowego, jeżeli spełniony jest warunek:

$$|e_{AF}| \geq B \quad (5)$$

gdzie: A – próg aktywacji modulatora MP, B – próg aktywacji klucza T_{BR} odpowiedzialnego za zmniejszenie wartości indukcyjności filtra wyjściowego modulatora MP, przy czym:

$$B > A.$$

Sygnał uchybu e_{AF} regulatora prądu w torze sterowania modułu AF jest jednocześnie sygnałem referencyjnym dla regulatora prądu modulatora MP. Ze względu na konieczność zapewnienia szerszego pasma przenoszenia (większej dynamiki układu) modulatora prądu w

porównaniu z modułem głównym źródła prądowego, częstotliwość przełączeń jego kluczy powinna być większa niż częstotliwość pracy kluczy modułu głównego.

W celu zapewnienia maksymalnej dynamiki dla opisywanej struktury źródła prądowego Habilitant zastosował w torze sterowania przekształtnikiem MP przestrajalny regulator prądu. Modyfikacja parametrów regulatorów jest konieczna ze względu na zmianę parametrów transmitancji układu otwartego tego modułu (w trakcie jego pracy), którą w analizowanym przypadku można opisać ogólnie zależnością (6).

$$G_o(s) = \frac{G_R(s)R_p e^{-s\tau}}{R_f + sL_f} k_{DC} \quad (6)$$

gdzie: $G_R(s)$ – transmitancja operatorowa regulatora prądu, R_p – stała przetwarzania przetwornika pomiarowego prądu, R_f – rezystancja pasozytnicza wyjściowego filtra dolnoprzepustowego, L_f – indukcyjność wyjściowego filtra dolnoprzepustowego, τ – stała czasowa związana z pracą modulatora PWM, k_{DC} – współczynnik wzmocnienia.

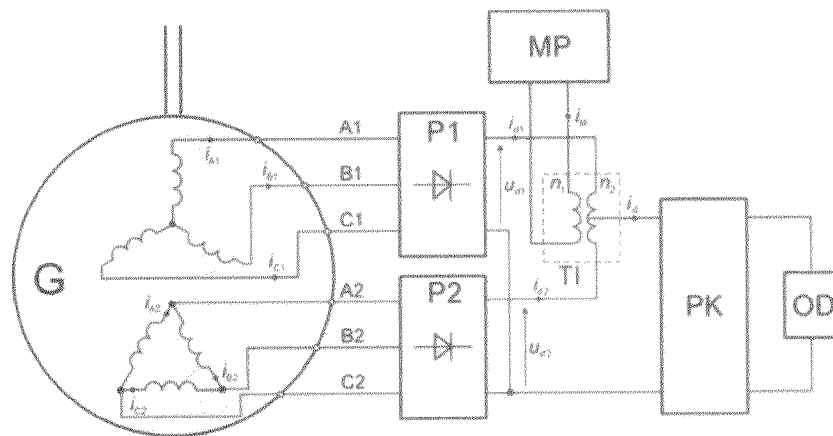
Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono zasadność zastosowania dodatkowego modułu modulatora prądu MP z przestrajalnym filtrem dolnoprzepustowym. Rozwiązanie to umożliwi zwiększenie dynamiki przekształtnika, a w konsekwencji poprawia jakość odwzorowania sygnałów referencyjnych o szerokim spektrum częstotliwościowym, co Autor wniosku uważa za osobiste osiągnięcie. W ramach dalszych prac, Habilitant zastosował opisywaną koncepcję źródła prądowego jako człon wykonawczy aktywnego kompensatora równoległego przeprowadzając badania dla wybranych odbiorników nieliniowych [6]. Na podstawie uzyskanych rezultatów stwierdzono słusność wykorzystania opracowanych struktur źródeł prądowych w tego typu aplikacjach - skuteczniejsza kompensacja niekorzystnego oddziaływania na sieć zasilającą odbiorników nieliniowych charakteryzujących się szerokim pasmem przenoszenia sygnałów.

System przekształcania energii bazujący na generatorze z modulacją strumienia magnetycznego

Habilitant jest również autorem oryginalnej koncepcji generatora elektrycznego PMSG o modulowanym strumieniu magnetycznym (możliwe jest jej rozszerzenie na inne typy generatorów) dedykowanego do zastosowania w tzw. OZE (odnawialnych źródłach energii)

[8]. Rozwiązanie to zostało zgłoszone do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej - nr zgłoszenia: 417162.

System bazuje na niekonwencjonalnej maszynie PMSG współpracującej z turbiną wiatrową lub wodną oraz układem przekształtnikowym umożliwiającym zwrot energii do sieci energetycznej lub wykorzystanie lokalne, w zależności od aktualnego zapotrzebowania. Głównym celem niniejszej koncepcji jest zapewnienie wysokiej efektywności przetwarzania energii mechanicznej na elektryczną przy zastosowaniu, jak najprostszego układu elektrycznego, co zwiększa stopień niezawodności. Rozwiązanie to dedykowane jest przede wszystkim dla systemów dużych mocy, gdzie szczególnie uwidacznia swoje zalety. Schemat blokowy systemu przedstawiono na rys. 13.



Rys. 13. Schemat blokowy systemu generatora energii elektrycznej z modulacją strumienia magnetycznego

W opisywanym rozwiązaniu pierwotne źródło energii elektrycznej stanowi generator (G), np. generator typu PMSG o niekonwencjonalnej budowie stojana, polegającej m.in. na zastosowaniu w nim dwóch 3-fazowych uzwojeń, z których jedno połączone jest w układzie „gwiazdy”, a drugie „trójkąta”. Taki układ połączeń ma na celu zapewnienie wymaganego przesunięcia napięć fazowych wynoszącego $\frac{\pi}{6}$. Napięcia przewodowe na zaciskach maszyny winny mieć przy tym taką samą wartość skuteczną. Oba uzwojenia obciążone są niezależnymi 6-pulsowymi niesterowanymi diodowymi układami prostownikowymi P1, P2. Z kolei na wyjściach prostowników włączony jest modulator MP. Bezpośrednie zmiany kształtu prądów wyjściowych jest możliwa poprzez oddziaływanie na nie prądu wyjściowego transformatora impulsowego z dzielonym uzwojeniem TI, włączonego pomiędzy blok modulatora, a wyjścia obu układów prostownikowych. Głównym zadaniem modulatora prądu jest zapewnienie właściwego kształtu prądów fazowych generatora tak, aby wypadkowa siła

magnetomotoryczna (mmf) związana z daną parą uzwojeń (gwiazda - trójkąt) była sinusoidalna, co pozwala zminimalizować straty mocy w jej obwodzie magnetycznym. Proces ten Autor nazwał "modulacją strumienia magnetycznego". W trakcie realizowanych badań, przy założeniu liniowości obwodu magnetycznego generatora, sygnał referencyjny dla MP (synchronizowany z wybranym napięciem fazowym) miał przebieg trójkątny, o częstotliwości sześciokrotnie wyższej od częstotliwości indukowanej w uzwojeniach maszyny siły elektromotorycznej. Uzyskany w tym przypadku przebieg siły magnetomotorycznej mmf skojarzonej z parą uzwojeń dla jednej fazy był dobrze zbliżony do sygnału sinusoidalnego. Wyniki prac Habilitant przedstawił w publikacjach [8, 11].

Z uwagi na znaczną zawartość składowych harmonicznycch (o wysokiej częstotliwości) w prądach fazowych generatora do wykonania jego uzwojeń wskazane jest użycie przewodu odpowiedniego typu, co pozwoli na minimalizację zjawiska wypierania prądu (obniżenie strat w miedzi). Korzystnym rozwiązaniem jest wykonanie uzwojeń stojana z przewodu typu lica.

Istotnym założeniem dla oczekiwanego działania układu kształtującego prądy generatora jest stałość w czasie prądu wyjściowego i_a systemu (rys. 13). Niemniej, konieczna jest automatyczna (na bazie dedykowanego układu sterowania) korekta jego wartości, co z kolei związane jest ze zmianami dysponowanej mocy wyjściowej generatora w wyniku, np. zmiany prędkości czynnika napędzającego turbinę. Wymóg ten narzuca odpowiednią konstrukcję bloku wyjściowego (PK) dostarczającego energię do odbiornika (OD). Ponadto w celu umożliwienia uzyskania maksymalnej efektywności całego systemu, blok PK powinien być sterowany z uwzględnieniem algorytmów MPPT, którymi to habilitant zajmował się w trakcie prowadzonych prac badawczych.

Innowacyjność prezentowanego powyżej rozwiązania generatora z modulacją strumienia polega m.in. na następujących jego cechach [8]:

- zastosowaniu w torze głównym systemu bardzo prostego (a zatem taniego, o wysokiej sprawności energetycznej) układu przekształtnikowego w postaci prostowników niesterowanych (co zwiększa również niezawodność opracowanego rozwiązania),
- zastosowaniu wielofazowego generatora o nietypowym układzie połączeń – zastosowano parę 3-fazowych uzwojeń o połączeniach „trójkąt” i „gwiazda”,
- wykorzystaniu do kształtowania prądu w uzwojeniach stojana generatora (a w konsekwencji również strumienia magnetycznego) nietypowego rozwiązania w postaci modulatora prądu (pełniącego funkcje modulatora strumienia magnetycznego) i transformatora impulsowego, których moce wyjściowe są na poziomie (typowo) tylko

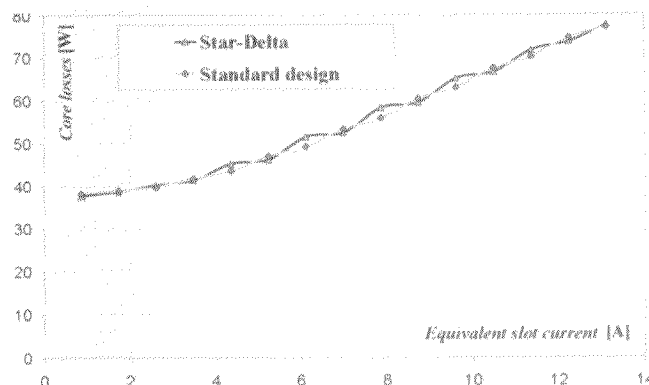
2÷3% całkowitej mocy wyjściowej systemu, co znacznie upraszcza jego konstrukcję, a tym samym obniża koszt jego wykonania (bardzo duża zaleta zwłaszcza w przypadku systemów dużych mocy).

Autor przeprowadził również badania porównawcze dla systemu konwersji energii bazującego na klasycznej 3-fazowej maszynie PMSG współpracującej ze sterowanym prostownikiem tranzystorowym o sinusoidalnych prądach wejściowych z opracowanym rozwiązaniem generatora z modulacją strumienia magnetycznego [8, 11]. Celem analizy porównawczej była ocena efektywności konwersji energii w obu systemach oraz nakładów inwestycyjnych. W tym przypadku zamodelowano zarówno obwody rozpatrywanych maszyn elektrycznych, wykorzystując m.in. metodę elementów skończonych, jak i odpowiednich układów przekształtnikowych odpowiedzialnych za wstępną konwersję energii elektrycznej. Na podstawie uzyskanych wyników Habilitant stwierdził m.in., że straty mocy w obwodach magnetycznych maszyn są na porównywalnym poziomie (rys. 14). Również przebiegi momentów elektromagnetycznych, jak i ich charakterystyki w funkcji wyznaczonych prądów ekwiwalentnych opisanych zależnością (7) mają zbliżony kształt (rys. 15).

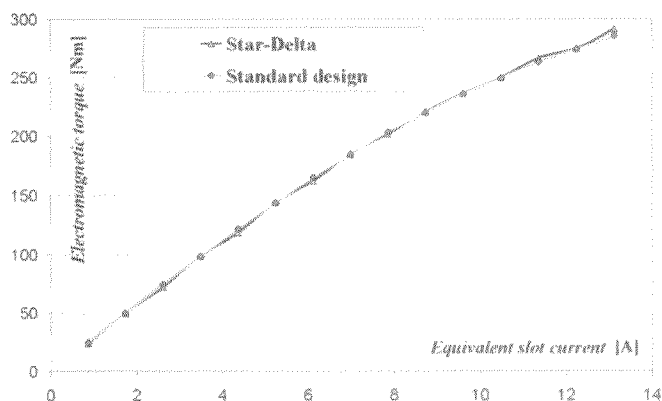
$$i_{cq} = \frac{N_{star} i_{star} + N_{delta} i_{delta}}{N_{star} + N_{delta}} \quad (7)$$

gdzie: i_{cq} – prąd ekwiwalenty generatora, N_{star} , N_{delta} - liczba zwojów uzwojeń o grupie połączeń odpowiednio w gwiazdę oraz trójkąt, i_{star} , i_{delta} - prądy uzwojeń o grupie połączeń odpowiednio w gwiazdę i trójkąt generatora.

Szacowany wzrost kosztu wykonania generatora o modulowanym strumieniu, w związku z nietypowym sposobem wykonania uzwojeń, nie powinien natomiast przekroczyć około 15%.

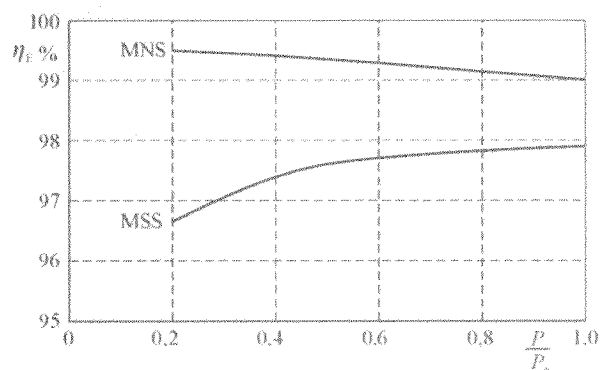


Rys. 14. Charakterystyki strat mocy w rdzeniu maszyny w funkcji wyznaczonego prądu ekwiwalentnego dla standardowego wykonania (Standard design) oraz dla koncepcji z modulacją strumienia magnetycznego (Star-Delta)



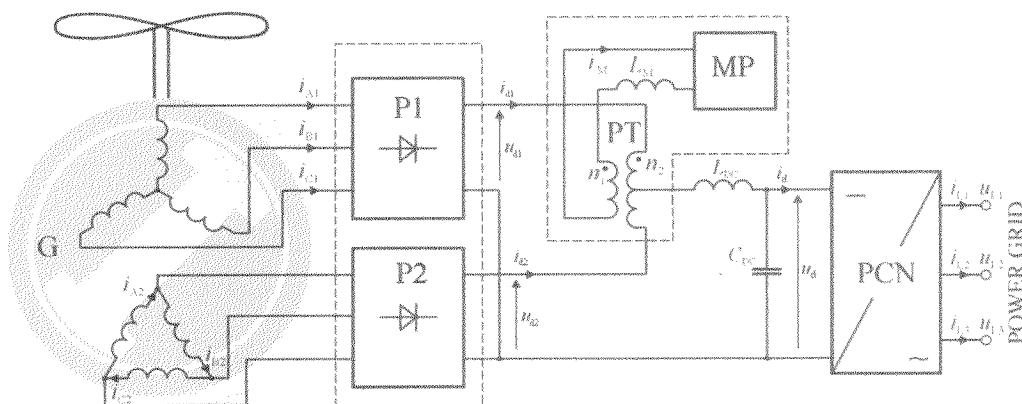
Rys. 15. Charakterystyki momentu elektromagnetycznego maszyny w funkcji wyznaczonego prądu ekwiwalentnego dla standardowego wykonania (Standard design) oraz dla koncepcji z modulacją strumienia magnetycznego (Star-Delta)

Jeśli chodzi o część przekształtnikową systemów odpowiedzialnych za wstępne przetwarzanie energii elektrycznej (dostarczanej do obwodu pośredniczącego prądu stałego) produkowanej przez oba typy konstrukcji maszyn, to współczynnik sprawności jest wyższy o 1.1% ÷ 2.9% (w zależności od zmienności wartości mocy wyjściowej) dla opracowanej koncepcji w porównaniu z rozwiązaniem bazującym na konwencjonalnym generatorze współpracującym z prostownikiem tranzystorowym o sinusoidalnych prądach wejściowych [8]. Fakt ten wynika z zastosowania w głównym obwodzie prostowników diodowych oraz niewielkiej mocy (rzędu 2÷3% całkowitej mocy wyjściowej) modulatora prądu wykorzystującego klucze w pełni sterowane. Należy przy tym podkreślić, że współczynnik sprawności analizowanego systemu przekształtnikowego wzrasta wraz ze zmniejszaniem się mocy wyjściowej (rys. 16). Stanowi to zatem kolejną zaletę opracowanej koncepcji, ponieważ w typowych warunkach pracy źródła energii odnawialnej OZE bardzo rzadko pracują w warunkach pracy znamionowej.



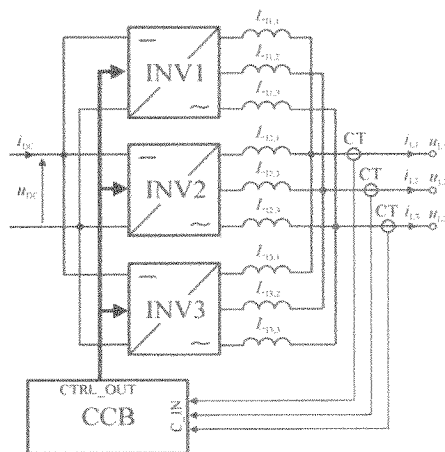
Rys. 16. Charakterystyki współczynnika sprawności w funkcji mocy wyjściowej układów przekształtnikowych odpowiedzialnych za wstępne przetwarzanie energii dla: standardowego rozwiązania (MSS) oraz opracowanej koncepcji (MNS)

W ramach dalszych etapów badań Habilitant opracował także oryginalną strukturę silnoprądową toru przekształtnikowego umożliwiającą nie tylko wstępne przetwarzanie wyprodukowanej energii elektrycznej, ale jej i oddawanie do sieci energetycznej napięcia przemiennego [11, 12]. Schemat ideowy zaprezentowano na rys. 17.



Rys. 17. Schemat ideowy systemu umożliwiającego oddawanie wyprodukowanej energii do sieci energetycznej bazujący na generatorze z modulacją strumienia magnetycznego

Założeniem wyjściowym było ponownie zapewnienie wysokiej sprawności energetycznej przy zachowaniu możliwie prostego obwodu elektrycznego. Blok (PCN) reprezentuje w tym przypadku falownik sieciowy o sinusoidalnych prądach sieciowych. W celu polepszenia jakości przekształcania energii (m.in. zwiększenie współczynnika sprawności oraz zmniejszenie zawartości niepożądanych harmonicznych w generowanych sygnałach) Autor zaproponował jego realizację w wersji wielokanałowej - w rozważanym przypadku $M = 3$ (rys. 18) [7, 12].



Rys. 18. Schemat blokowy modułu wyjściowego PCN w wersji trójkanałowej ($M=3$)

Dodatkowo w obwodzie pośredniczącym prądu stałego zastosowano filtr LC umożliwiający poprawną pracę bloków modulatora prądu (strumienia magnetycznego) oraz wyjściowego falownika sieciowego. Takie rozwiązanie, przy zastosowaniu odpowiednich algorytmów sterowania modułami MP oraz PCN, pozwoliło na rezygnację z dodatkowych układów przekształtnikowych w rozpatrywanym obwodzie. Szczegółową zestawienie otrzymanych wyników opracowanego układu zaprezentowano w publikacji [12].

Prowadzone prace były ukierunkowane przede wszystkim na opracowanie metod umożliwiających polepszenie współczynników jakości przekształcanej energii elektrycznej, zwiększenia efektywności działania przy jednoczesnym ograniczeniu stopnia komplikacji rozpatrywanych przez Habilitanta układów energoelektronicznych. W tym celu wykorzystano technikę modulacji prądów. Do najważniejszych osiągnięć w głównym nurcie badań Autor wniosku zalicza:

- polepszenie wybranych wskaźników jakości przekształcania energii i zwiększenie stopnia niezawodności, jak i uniwersalności w układach prostownikowych poprzez zastosowanie trybu wielokanałowego oraz nowej zależności opisującej sygnał referencyjny dla modulatora prądu;
- zwiększenie pasma przenoszenia sygnałów energoelektronicznych sterowanych źródeł prądowych oraz układów aktywnej kompensacji równoległej w wyniku zastosowania m.in. dodatkowego modułu MP z przestrajalnym filtrem wyjściowym;
- opracowanie koncepcji i struktury generatora energii elektrycznej o modulowanym strumieniu magnetycznym, charakteryzującego się wysokim stopniem niezawodności oraz wysoką sprawnością energetyczną;
- opracowanie autorskiego systemu przekształtnikowego z myślą o współpracy z generatorem synchronicznym PMSG o modulowanym strumieniu magnetycznym, tj. systemu umożliwiającego zwrot energii do sieci przy jednoczesnej minimalizacji niekorzystnego oddziaływania na jej parametry.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych)

Prowadzone prace badawcze dotyczyły przede wszystkim tematyki związanej z modulacją prądów i strumienia magnetycznego poprzez zastosowanie dodatkowego przekształtnika energoelektronicznego w postaci w pełni sterowanego energoelektronicznego źródła prądowego.

W rozpatrywanym okresie Habilitant prowadził także prace związane m.in. z:

- metodami modelowania zjawisk zachodzących w cyfrowych układach sterowania układami energoelektronicznymi,
- systemami sterowania układami energoelektronicznymi bazującymi na sztucznych sieciach neuronowych,
- systemami konwersji energii pozyskiwanej z OZE (odnawialnych źródeł energii),
- rozproszonymi układami sterowania cyfrowego,
- systemami ładowania i kontroli baterii akumulatorowych różnego typu,
- przekształtnikami energoelektronicznymi (układami prostownikowymi oraz zasilaczami awaryjnymi UPS) o zwiększonej funkcjonalności, charakteryzującymi się dodatkową możliwością kompensacji niekorzystnego oddziaływania na sieć zasilającą innych odbiorników.

Habilitant brał także udział w projektowaniu i budowie, przy współpracy z firmą Eurotech-Jacht w ramach stażu, urządzenia o nazwie HPS (Hydrous Power System) umożliwiającego konwersję energii wody napędzającej doczepny jachtowy silnik manewrowy na energię elektryczną o wymaganych parametrach. System został nominowany w kategorii Innowacyjna Inwencja w Konkursie o Nagrodę Marszałka Województwa Wielkopolskiego. Ponadto urządzenie to otrzymało Nagrodę Gwoźdźcia międzynarodowych Targów WIATR i WODA 2014 w kategorii osprzęt i wyposażenie. Rozwiązanie zostało również zgłoszone do Urzędu Patentowego - numer zgłoszenia: 407320. Ponadto, w ramach współpracy ze wymienioną firmą, habilitant opracował system automatyki urządzeń pokładowych jednostek jachtowych oraz jest współautorem systemu alarmowego dla jednostek pływających, który został wdrożony do produkcji.

Autor jest również współautorem systemu generującego energię elektryczną dedykowanego dla urządzeń treningowych napędzanych siłą ludzkich mięśni, w szczególności rowerów treningowych. Wynalazek ten został zgłoszony do Urzędu Patentowego - numer zgłoszenia: 410074. Urządzenie to umożliwia niezależną pracę poszczególnych stanowisk treningowych oraz regulację mocy obciążenia przy jednoczesnym generowaniu energii elektrycznej i jej magazynowaniu, bądź wykorzystaniu w zależności od istniejących potrzeb. Opracowano i zaimplementowano w tym przypadku modyfikacje stosowanych algorytmów MPPT (Maximum Power Point Tracking). Urządzenie do również zostało wdrożone do produkcji.

Ponadto Habilitant brał udział w realizacji projektów w ramach współpracy z przemysłem, tj.:

- Tytuł projektu: „Opracowanie i wykonanie badań laboratoryjnych w zakresie oceny parametrów technicznych prototypu urządzenia UPS”, 2015r., 04/42/PRJ6/0311, projekt realizowany z ramienia Politechniki Poznańskiej dla AlfineLogistic Wiesław Kaźmierczak, 61-249 Poznań, charakter udziału autora: wykonawca.
- Tytuł projektu: „Wykonanie ekspertyzy badania zestawów oświetleniowych LED CANDOR”, 2017r., 04/42/PRJ6/0379, projekt realizowany z ramienia Politechniki Poznańskiej dla Lidl, charakter udziału autora: wykonawca.
- Tytuł projektu: „Badania urządzenia typu BCHR-EL do ładowania modułu akumulatorowego z bateriami LiION”, 2017r., 04/42/PRJ6/0395, projekt realizowany z ramienia Politechniki Poznańskiej dla Zakładu Produkcyjno-Handlowego ELEKS, 67-200 Głogów, charakter udziału autora: kierownik.
- Tytuł projektu: „Badania laboratoryjne modułu akumulatorowego z bateriami LiIon”, 2017r., 04/42/PRJ6/0396, projekt realizowany z ramienia Politechniki Poznańskiej dla Zakładu Produkcyjno - Handlowego ELEKS, 67-200 Głogów, charakter udziału autora: wykonawca.
- Tytuł projektu: „Wykonanie badań lamp TYTAN”, 2017r., 04/42/PRJ6/0397, projekt realizowany z ramienia Politechniki Poznańskiej dla Zakładu Produkcyjno-Handlowego ELEKS, 67-200 Głogów, charakter udziału autora: kierownik.
- Tytuł projektu: „Przeprowadzenie szkolenia - seminarium w zakresie zasad programowania układów mikroprocesorowych DSP firmy Analog Devices z ukierunkowaniem na zastosowanie w energoelektronice”, 2018r., 04/42/PRJ6/0422, projekt realizowany z ramienia Politechniki Poznańskiej dla Zakładu Produkcyjno-Handlowego ELEKS, 67-200 Głogów, charakter udziału autora: wykonawca.

W wyniku realizacji projektów: 04/42/PRJ6/0311, 04/42/PRJ6/0395 oraz 04/42/PRJ6/0396, w których autor pełnił funkcje kierownika bądź wykonawcy, wyżej wymienione urządzenia są obecnie eksploatowane przez oddział dołowy KGHM, wnosząc nową jakość w sensie parametrów techniczno - ekonomicznych.

6. Działalność dydaktyczna

Habilitant przygotowywał oraz prowadził zajęcia wykładowe obejmujących następujące przedmioty:

- Programowalne układy logiczne na kierunku Elektrotechnika, studia I stopnia,

- Programowalne sterowniki logiczne na kierunku Elektrotechnika, studia I stopnia,
- Metody komputerowe w systemach sterowania na kierunku Elektrotechnika, studia I stopnia,
- Komputerowe interfejsy komunikacyjne na kierunku Elektrotechnika, studia I stopnia,
- Elektronika i energoelektronika na kierunku Elektrotechnika, studia I stopnia,
- Elektronika i energoelektronika na kierunku Elektrotechnika, studia II stopnia,
- Podstawy elektroniki na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn, studia II stopnia.

Ponadto prowadził, opracowując również materiały dydaktyczne, zajęcia o charakterze ćwiczeniowym, projektowym oraz laboratoryjnym (także dla studentów zagranicznych w ramach programu Erasmus). Pełnił funkcje opiekuna laboratoriów - jest autorem, bądź współautorem 16 stanowisk fizycznych. Był też promotorem (85 prac dyplomowych) i opiekunem praktyk ogólnotechnicznych oraz specjalnościowych. Opracował także materiały dydaktyczne oraz prowadził zajęcia wykładowe i laboratoryjne dla Słuchaczy Studium Podyplomowego „*Metody informacyjne w mechatronice*”, 2008 - 2012. realizowanych w ramach programu Era Inżyniera. Uczestniczył także w Dniach Otwartych oraz Nocy Naukowców Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej. Ponadto w br. Habilitant został wyróżniony jako najwyżej oceniany przez studentów wykładowca Instytutu Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej.

7. Działalność organizacyjna

Autor był członkiem komitetów organizacyjnych konferencji naukowej „Power Electronics and Motion Control EPE-PEMC”, sympozjum naukowego z cyklu „Energoelektronika w Nauce i Dydaktyce” oraz redakcji monografii *Rozwój regionalny - Wybrane aspekty*”, ISBN 978-83-62062-33-1. Wielokrotnie recenzował też artykuły zgłaszane na konferencje krajowe, jak i zagraniczne.

Ponadto pełni funkcje koordynatora w ramach umowy partnerskiej z Politechniką Poznańską z:

- Zespołem Szkół Technicznych im. E. Kwiatkowskiego w Grodzisku Wielkopolskim,
- Akademią Dobrej Edukacji im. Czesława Niemena w Jarocinie.

8. Podsumowanie

Prowadzone prace badawcze przez Habilitanta związane z modulacją prądów w układach energoelektronicznych dotyczyły m.in.:

- rozwinięcia koncepcji prostownika mocy o polepszonych wskaźnikach energetycznych,
- szerokopasmowych sterowanych źródeł prądowych,
- aktywnych kompensatorów równoległych charakteryzujących się możliwością kompensacji sygnałów o dużej dynamice,
- systemów przetwarzania energii w OZE dedykowane dla elektrowni wiatrowych i wodnych wykorzystujących prostownikowe układy mocy z modulatorem prądu,
- koncepcji generatora energii elektrycznej o modulowanym strumieniu magnetycznym,
- systemu umożliwiającego zwrot wytwarzanej energii do sieci energetycznej bazującego na generatorze o modulowanym strumieniu magnetycznym.

Wynikiem prowadzonych badań są opracowania struktur obwodów energetycznych, jak i algorytmów sterowania omawianych układów, które to zostały opisane w przedstawionym monotematycznym cyklu publikacyjnym. Zaprezentowano w nich zarówno wyniki badań symulacyjnych, jak i eksperymentalnych.

Habilitant jest autorem, bądź współautorem 65 publikacji naukowych obejmujących czasopisma, materiały konferencyjne oraz rozdziału w monografii. Wynikiem przeszukania bazy Web of Science Core Collection jest 49 cytowań 33 publikacji; h-index = 2. Publikacje te są cytowane w 32 artykułach cytujących (Baza Web of Science Core Collection indeksuje 17 publikacji habilitanta, z czego 2 publikacje są cytowane 7 razy). Wynikiem przeszukania bazy Scopus jest 69 cytowań 38 publikacji; h-index = 3. Publikacje te są cytowane w 46 artykułach cytujących. Sumaryczny ImpactFactor dla czasopism według listy Journal Citation Reports zgodny z rokiem opublikowania wynosi: 3,065. Suma punktów MNiSW dla przedstawionych publikacji wynosi 418. Przedstawiona analiza dorobku naukowego została wykonana przez Oddział Informacji Naukowej Biblioteki Politechniki Poznańskiej.