



POLITECHNIKA LUBELSKA  
WYDZIAŁ  
ELEKTROTECHNIKI I INFORMATYKI



PROFESOR

**Marian Piotr Kaźmierkowski**

Doktor Honoris Causa  
Politechniki Lubelskiej

Lublin 2018

# POLITECHNIKA LUBELSKA



Profesor

**Marian Piotr Kaźmierkowski**

Doktor Honoris Causa  
Politechniki Lubelskiej



Lublin 2018



Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

Copyright by Politechnika Lubelska 2018

ISBN: 978-83-7947-310-6



**Uchwała Nr 8/2018/II  
Senatu Politechniki Lubelskiej  
z dnia 15 marca 2018 r.**

*w sprawie nadania  
prof. dr. hab. inż. Marianowi Piotrowi Kaźmierkowskiemu  
tytułu doktora honoris causa Politechniki Lubelskiej*

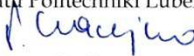
Działając zgodnie z § 27 ust. 2 pkt 5 Statutu Politechniki Lubelskiej, oceniając dorobek naukowy, dydaktyczny i organizacyjny jako wybitny, na podstawie opinii wyrażonej przez prof. dr. hab. inż. Henrykę Danutę Stryczewską, promotora tego przewodu, oraz uwzględniając opinie Senatów: Politechniki Poznańskiej, Politechniki Warszawskiej oraz Politechniki Wrocławskiej, Senat Politechniki Lubelskiej

**n a d a j e**

**prof. dr. hab. inż. Marianowi Piotrowi Kaźmierkowskiemu**

**tytuł**

**DOKTORA HONORIS CAUSA  
POLITECHNIKI LUBELSKIEJ.**

Przewodniczący  
Senatu Politechniki Lubelskiej  
  
R e k t o r  
Prof. dr hab. inż. Piotr Kacejko

SUMMIS AUSPICIIS  
SERENISSIMAE REI PUBLICAE POLONORUM  
NOS  
RECTOR ET SENATUS POLYTECHNICAЕ LUBLINENSIS  
ET  
DECANUS FACULTATIS ELECTROTECHNICAЕ ET INFORMATICAЕ  
SIMULQUE PROMOTOR RITE CONSTITUTUS  
CUM  
UNANIMO CONSENSU SENATUUM  
POLYTECHNICAЕ POSNANIENSIS, POLYTECHNICAЕ WRATISLAVIENSIS,  
POLYTECHNICAЕ VARSOVIENSIS

IN  
CLARISSIMUM ET DOCTISSIMUM VIRUM  
TECHNICAЕ RATIONIS AC DOCTRINAE PERITUM, DISCIPLINARUM TECHNICARUM  
DOCTOREM HABILITATUM, PROFESSOREM ORDINARIUM,  
ARTIS ENERGIELECTRONICAЕ CERTE PRUDENTISSIMUM  
SOCIUM ACADEMIAE SCIENTIARUM POLONAE ORDINARIUM

## MARIANUM PETRUM KAŻMIERKOWSKI

QUI ET MULTIS IN SUA DISCIPLINA OPERIBUS EDITIS ELUXIT ET CETERIS  
ANTECEDENS ARTEM ENERGIELECTRONICAM AUXIT NECNON SYSTEMATA  
PROPULSUS ELECTRICI GUBERNANDI CONFORMAVIT  
QUI ETIAM STUDIIS ET FABRICAЕ MULTAM POLYTECHNICAM PROGENIEM EDOCUIT  
ET ITEM DE DOCTRINAE TECHNICARUMQUE ARTIUM IN ORBE TERRARUM  
PROGRESSU BENE MERUIT

## DOCTORIS HONORIS CAUSA SCIENTIARUM TECHNICARUM

NOMEN AC DIGNITATEM, IURA AC PRIVILEGIA CONTULIMUS IN EIUSQUE REI FIDEM  
HOC DIPLOMA SIGILLO POLYTECHNICAЕ LUBLINENSIS SANCIENDUM CURAVIMUS

HENRICA D. STRYCZEWSKA  
H. T. DECANUS ET PROMOTOR

PETRUS KACEJKO  
H. T. RECTOR MAGNIFICUS

LUBLINI, DIE XV MENSIS MAII A. D. MMXVIII

Prof. Henryka Danuta Stryczewska  
Dziekan Wydziału Elektrotechniki  
i Informatyki Politechniki Lubelskiej

## LAUDACJA

z okazji nadania profesorowi Marianowi Piotrowi Kaźmierowskiemu  
godności Doktora Honoris Causa Politechniki Lubelskiej

*Magnificencjo Rektorze, Wysoki Senacie, Czcigodni Doktorzy Honoris Causa  
i Profesorowie Honorowi Politechniki Lubelskiej, Wielce Dostojni Goście*

Z woli Senatu Politechniki Lubelskiej i Rady Wydziału Elektrotechniki i Informatyki, w tym szczególnym dla naszej Uczelni dniu, a także w przededniu przypadającej w nadchodzącym roku akademickim 55 rocznicy utworzenia wydziału elektrycznego w naszej uczelni, mam zaszczyt i przyjemność wygłoszenia mowy sławiącej Osobę i dokonania Profesora Mariana Piotra Kaźmierkowskiego, wybitnego specjalisty w dyscyplinie naukowej elektrotechnika, twórcy uznanej w kraju i na świecie szkoły w zakresie energoelektroniki i napędu elektrycznego, wychowawcy wielu znanych środowisku pracowników naukowych i inżynierów, uczonego o ogromnym autorytecie międzynarodowym, naszego przyjaciela.

Profesor Marian Piotr Kaźmierkowski urodził się w 1943 roku. Studia ukończył w roku 1968 na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Z tą uczelnią i wydziałem związał się na stałe, uzyskując kolejne stopnie i tytuły naukowe. Doktorat obronił w 1972 roku, habilitował się w 1981 roku, a tytuł profesora uzyskał w 1991 roku.

Działalność naukową i dydaktyczną profesor realizował pracując w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie-Międzyzlesiu w latach 1967–1969 i 1996–2016; w Polskiej Akademii Nauk (w okresie 2011–2014) i nieprzerwanie, od 1969 r. do chwili obecnej, w Instytucie Sterowania i Elektrotechniki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej, w którym przez sześć kadencji, tj. od 1987–2008 r. pełnił funkcję dyrektora, a w latach 1993–1996 kierownika Zakładu Energoelektroniki.

O wysokim prestiżu w krajowym środowisku naukowym świadczy członkostwo Profesora Mariana Piotra Kaźmierkowskiego w radach naukowych

instytutów: Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów, Instytutu Tele i Radiotechnicznego, Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych i Instytutu Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej PAN. Profesor Marian Kaźmierkowski wykładał i prowadził badania w wielu ośrodkach naukowo-badawczych i uczelniach zagranicznych. Jako stypendysta fundacji Alexandra von Humboldta, w latach 1980-1983 prowadził badania naukowe w Aachen, następnie w latach 1986-1987 pracował w Norweskim Instytucie Technologicznym w Trondheim. Jako profesor wizytujący odbył kilkanaście staży w uczelniach europejskich w Alborgu, Bolonii, Tuluzie, Seville i Padwie oraz w uczelniach amerykańskich – Knoxville, Minneapolis i Reno w Nevadzie.

Od 1991 roku Profesor Kaźmierkowski jest członkiem Komitetu Elektrotechniki Polskiej Akademii Nauk. W 2007 r. został członkiem korespondentem Polskiej Akademii Nauk, a od roku 2016 jest członkiem rzeczywistym PAN. W latach 1999–2007 pełnił funkcję przewodniczącego Sekcji Energoelektroniki i Napędu Elektrycznego Komitetu Elektrotechniki PAN. W kadencji 2011–2014 pełnił funkcję Dziekana Wydziału Nauk Technicznych oraz członka Prezydium PAN.

Głównym obszarem działalności naukowej Profesora Mariana P. Kaźmierowskiego są zagadnienia sterowania wektorowego napędów przekształtnikowych, w szczególności z silnikami indukcyjnymi klatkowymi oraz synchronicznymi o magnesach trwałych. Prace badawcze dotyczą nowych topologii trójfazowych przekształtników rezonansowych, technik modulacji szerokości impulsów minimalizujących straty łączeniowe w przekształtnikach trójfazowych, metod eliminacji czujników pomiarowych w urządzeniach energoelektronicznych sterowanych w czasie rzeczywistym przy wykorzystaniu procesorów sygnałowych, systemów indukcyjnego zasilania bezstykowego, prostowników aktywnych i sprzęgów energoelektronicznych dla energetyki odnawialnej oraz zastosowania metod sztucznej inteligencji i sterowania predykcyjnego w energoelektronice i zautomatyzowanym napędzie elektrycznym.

Kierunki prac badawczych i aplikacyjnych prof. Kaźmierowskiego obejmują zagadnienia wpisujące się w dominujące tendencje światowe, a w wymiarze krajowym mają niewątpliwie charakter pionierski.

Profesor Marian P. Kaźmierkowski opublikował wyniki swoich badań w ponad 400 publikacjach, z czego 250 to pozycje anglojęzyczne oraz w 8 monografiach wydanych przez prestiżowe wydawnictwa: Springer-Verlag, Academic Press, CRC Taylor & Francis, Elsevier. Ponad 185 artykułów Profesora jest opublikowanych w czasopiśmie indeksowanych w bazie JCR, a liczba ich cytowań jest imponująca i według bazy Web of Science, wynosi 5040, z indeksem Hirscha równym 22, według bazy Scopus liczba cytowań wynosi prawie 8134

i  $H=32$ , zaś według Google Scholar odpowiednio 13615 z indeksem Hirscha równym 42.

Profesor jest twórcą lub współtwórcą 17 patentów w zakresie automatyki napędu i energoelektroniki, a także autorem 4 podręczników, które stanowią cenną bazę do kształcenia kolejnych pokoleń inżynierów energoelektroników.

W uznaniu dokonań naukowych Profesor Marian P. Kaźmierkowski został czterokrotnie uhonorowany tytułem doktora honoris causa przez Aalborg University w Danii (2004 r.), Institut National Polytechnique de Toulouse we Francji (2010 r.) oraz w kraju przez Uniwersytet Zielonogórski (2012 r.) i Politechnikę Białostocką (2017 r.). Profesor Marian P. Kaźmierkowski jest także członkiem międzynarodowej Akademii Elektrotechniki w Rosji (od 2001 r.) oraz honorowym członkiem Węgierskiej Akademii Nauk (od 2010 r.).

Szczególne dokonania Profesora Kaźmierkowskiego są związane z działalnością w IEEE – światowym stowarzyszeniu inżynierów elektryków i elektroników, w którym pełni ważne funkcje naukowe, zarówno w kraju, jak i zagranicą. W Polsce był inicjatorem, organizatorem i pierwszym przewodniczącym oddziałów *Industrial Electronics* oraz *Power Electronics* w Polskiej Sekcji IEEE. Pełnił też funkcję przewodniczącego Polskiej Sekcji w latach 2002–2005. Od prawie 25 lat (od 1994 r.) jest członkiem rady programowej czasopisma naukowego *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, przy czym był również redaktorem naczelnym tego czasopisma w latach 2004–2006. Od 1996 r. jest członkiem międzynarodowej rady stowarzyszenia *Power Electronics and Motion Control* (PEMC) z siedzibą w Budapeszcie.

W 2017 r. z inicjatywy 4 stowarzyszeń IEEE: Industry Applications, Industrial Electronics, Power Electronic i Power & Energy, nagrodzono Profesora Kaźmierkowskiego prestiżowym medalem *IEEE Medal in Power Engineering*. W uzasadnieniu przyznania tego medalu, napisano, że nadano go Profesorowi za: „*For outstanding contribution to the technology associated with the generation, transmission, distribution, application and utilization of electric power for the betterment of society*” (za wybitny wkład w technologie wytwarzania, przesyłania, dystrybucji, zastosowania i wykorzystania energii elektrycznej dla dobra społeczeństwa). Dalej czytamy w uzasadnieniu, że: „*Jego system bezczujnikowego sterowania oparty na cyfrowym przetwarzaniu sygnału poprawił wydajność silników indukcyjnych stosowanych w napędach autobusów, tramwajów i kolei podziemnych, umożliwiając szeroki zakres regulacji prędkości i momentu obrotowego. Prace Prof. Kaźmierowskiego i jego zespołu istotnie wpłynęły na rozwój zastosowań energii odnawialnej. Opracował układ energoelektroniczny dla europejskiego generatora energii odnawialnej z fal morskich Wave Dragon, zainstalowanego na oceanie Atlantyckim. Kontrolery oparte na teoriach Profe-*

sora można również znaleźć w systemach fotowoltaicznych i konwerterach farm wiatrowych”.

Profesor M. P. Kaźmierkowski jest twórcą szkoły naukowej energoelektroniki i napędu elektrycznego. Wypromował ponad 30 doktorów, z których wielu pracuje w uczelniach zagranicznych (Norwegia, Niemcy, Egipt, Libia) oraz placówkach badawczych znanych koncernów elektrotechnicznych. Profesor utrzymuje ścisłą współpracę z wieloma ośrodkami naukowymi na świecie. Jest laureatem prestiżowych, międzynarodowych oraz krajowych nagród i wyróżnień, Laureatem Subsydium Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej, 2 Nagród *IEEE Industrial Electronics Society* (USA), Nagrody badawczej Siemens oraz 5 Nagród MNiSW, w tym Nagrody za całokształt osiągnięć (2013 r.).

Należy przywołać niezwykle aktywność Profesora w pozyskiwaniu i realizacji projektów badawczych. Profesor kierował 6 grantami międzynarodowymi oraz 4 grantami krajowymi; był kierownikiem 7 grantów promotorskich KBN oraz opiekunem naukowym w 7 grantach doktorskich finansowanych przez NCN. W imponującym dorobku naukowo-badawczym Profesora znajdują się duże projekty przemysłowe i celowe. W swej pracy naukowo-badawczej i dydaktycznej Profesor skutecznie łączy teorię z praktyką, co owocuje wdrażaniem wielu nowatorskich rozwiązań przemysłowych do produkcji. Zrealizowane przez firmy ABB, TWERD, TRUMPF Huettinger wdrożenia dotyczą zastosowań przekształtników w urządzeniach napędowych oraz do bezstykowego transferu energii elektrycznej.

W latach 2003–2006 w ramach V Ramowego programu Unii Europejskiej Prof. Kaźmierkowski wraz z zespołem uruchomił w Politechnice Warszawskiej i kierował Europejskim Centrum Doskonałości w zakresie Power Electronics and Intelligent Control for Energy Conservation o akronimie PELINCEC, które stało się międzynarodowym liderem w badaniach i edukacji w obszarze energoelektroniki.

Tutaj pozwolę sobie na prywatną dygresję. W tym samym okresie i w tym samym V Programie Ramowym UE, w pierwszym konkursie na Centra Doskonałości, także na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki PL prof. Janowski, przy moim skromnym udziale, uzyskał finansowanie i uruchomił Centrum Doskonałości w zakresie Application of Superconducting and Plasma Technologies in Power Engineering ASPPECT. Podczas trzech lat realizacji tych projektów, dyrektorzy polskich centrów doskonałości kilkakrotnie spotkali się w Brukseli, sprawozdając merytoryczne i finansowe efekty działalności. Był to okres, gdy spotkaliśmy się z prof. Kaźmierowskim częściej w Brukseli niż w Polsce. Pamięamy wielką przychylność, wsparcie i dobre rady Profesora, znacznie bardziej od nas doświadczonego w realizacji projektów europejskich.

---

Profesor M. P. Kaźmierkowski od 40 lat współpracuje z Politechniką Lubelską. Twórczo inspiruje i wspiera pracowników i absolwentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej, jako opiekun naukowy, promotor, recenzent rozpraw doktorskich i monografii pracowników. Prowadzi wykłady i seminaria dla doktorantów i młodych pracowników nauki. Jego pomoc merytoryczna i organizacyjna przejawia się w realizacji projektów badawczych, organizacji i udziału w seminariach i konferencjach naukowych i jest nie do przecenienia.

Cieszy się Wydział Elektrotechniki i Informatyki, raduje się społeczność akademicka Politechniki Lubelskiej, że w roku jubileuszowym 65-lecia Uczelni najwyższą godność akademicką – tytuł Doktora Honoris Causa – nadajemy wybitnemu polskiemu uczonemu o światowym autorytecie w obszarze energoelektroniki i napędów elektrycznych, twórcy uznanej w świecie szkoły naukowej, wychowawcy młodych pracowników nauki, przyjacielowi Politechniki Lubelskiej.

Drogi Panie Profesorze, proszę przyjąć ten tytuł jako wyraz szacunku społeczności Politechniki Lubelskiej za wszystkie Pana osiągnięcia i wieloletnią z nami współpracę.



## POLITECHNIKA POZNAŃSKA

*prof. dr hab. inż. Tomasz Łodygowski*

**Rektor**

Poznań, dnia 2 lutego 2018 r.

RO-073/4/18/4

Pan

**prof. dr hab. inż. Piotr KACEJKO**

JM Rektor

Politechniki Lubelskiej

L U B L I N

*Magnifico, Szanowny Panie Rektore!*

Z przyjemnością informuję Pana rektora, iż Senat Akademicki Politechniki Poznańskiej na posiedzeniu w dniu 31 stycznia 2018 r. poparł wniosek Politechniki Lubelskiej o nadanie tytułu doktora honoris causa prof. Marianowi Kaźmierkowskiemu.

W załączeniu przesyłam Uchwałę Senatu Akademickiego Politechniki Poznańskiej wraz z opracowaną w tej sprawie opinią.

Z poważaniem



SENAT AKADEMICKI  
POLITECHNIKI POZNAŃSKIEJ  
Kadencja 2016-2020

**Uchwała Nr 73/2016-2020**  
**Senatu Akademickiego Politechniki Poznańskiej**  
**z dnia 31 stycznia 2018 r.**

**w sprawie zaopiniowania wniosku Politechniki Lubelskiej**

Działając na podstawie art. 62 ust. 1 ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2017 r. poz. 2183, z późn. zm.), Senat Akademicki popiera inicjatywę Politechniki Lubelskiej dotyczącą nadania tytułu doktora honoris causa prof. Marianowi Kaźmierkowskiemu i przyjmuje recenzję przygotowaną w tej sprawie przez prof. dr. hab. inż. Krzysztofa Zawirskiego jako opinię Senatu Akademickiego Politechniki Poznańskiej.

Uchwała wchodzi w życie z dniem podjęcia.

Przewodniczący Senatu  
Rektor Politechniki Poznańskiej

prof. dr hab. inż. Tomasz Łodygowski

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Zawirski  
Politechnika Poznańska

Poznań, 22.01.2018

**Opinia  
dla Senatu Politechniki Poznańskiej  
w sprawie nadania  
profesorowi dr. hab. inż. Marianowi P. Kaźmierkowskiemu  
tytułu Doktora *Honoris Causa* Politechniki Lubelskiej**

Profesor Marian Piotr Kaźmierkowski urodził się w roku 1943. Jest absolwentem Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej z roku 1968. Na Wydziale tym w roku 1972 obronił rozprawę doktorską, w roku 1981 habilitował się a tytuł profesora uzyskał w roku 1991. Z Politechniką Warszawską Profesor M. Kaźmierkowski związał swoje zawodowe życie, gdzie stworzył własną szkołę badawczą, organizacyjnie związaną z kierowanym przez siebie przez blisko 20 lat Instytutem Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, w którym pełnił funkcję Dyrektora w latach 1987 -1990 i 1993 - 2008.

Profesor Kaźmierkowski piastuje i piastował wiele prestiżowych funkcji pochodzących z wyboru w krajowych i międzynarodowych instytucjach i towarzystwach naukowych. W roku 2007 został członkiem korespondentem PAN a w roku 2016 członkiem zwyczajnym PAN. W kadencji 2011 - 2014 pełnił funkcję Dziekana Wydziału IV Nauk Technicznych PAN. Jest członkiem honorowym Węgierskiej Akademii Nauk w Budapeszcie od roku 2010, członkiem międzynarodowej Akademii Elektrotechniki w Rosji od 2001 roku, a od 1998 roku członkiem o najwyższej randze - *Fellow Member Grade* - Amerykańskiego Stowarzyszenia Inżynierów (*Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE*). W stowarzyszeniu tym pełnił w latach 1999 – 2001 funkcję zastępcy prezydenta Towarzystwa Elektroniki Przemysłowej (*V-ce President of Industrial Electronic Society – IEEE*). Od roku 1994 jest członkiem rady programowej prestiżowego naukowego czasopisma amerykańskiego *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pełniąc w latach 2004 - 2006 funkcję redaktora naczelnego (*Editor-in-Chief*) a w latach 2006 - 2009 funkcję byłego redaktora naczelnego (*Past-Editor-in Chief*). Jest też członkiem zespołu redakcyjnego amerykańskiego czasopisma *IEEE Industrial Electronics Magazine* od roku 2006, czasopisma koreańskiego *Journal of Power Electronics* od roku 2004 oraz zastępcą redaktora naczelnego *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences* od roku 2011. Od roku 1996 jest członkiem międzynarodowej Rady

„Power Electronics and Motion Control - PEMC” z siedzibą w Budapeszcie. Był organizatorem, a w latach 1994 - 2007 również przewodniczącym, wspólnego Oddziału Towarzystw *Industrial Electronics* i *Power Electronics* w polskiej Sekcji *IEEE* a w latach 2002 - 2005 przewodniczącym tej Sekcji. W latach 1999 - 2011 piastował funkcję przewodniczącego Sekcji Energoelektroniki i Napędu Elektrycznego Komitetu Elektrotechniki PAN.

Tematyka prac badawczych Profesora Mariana Kaźmierkowskiego ulokowana jest w dyscyplinie elektrotechnika i łączy w sobie zagadnienia energoelektroniki, elektroniki przemysłowej i automatyki napędu elektrycznego. Prof. Kaźmierkowski należy do grona światowych liderów, a w kraju jest jednym z twórców, dyscypliny „Napęd elektryczny i energoelektronika”. Wyniki jego prac badawczych obejmują takie główne nurty jak: sterowanie wektorowe napędów falownikowych, konstrukcje i sterowanie prostowników i filtrów aktywnych, zastosowanie metod sztucznej inteligencji w energoelektronice oraz w ostatnim czasie zagadnienia bezkontaktowego zasilania energią elektryczną. Do najbardziej znaczących jego osiągnięć badawczych można zaliczyć:

- Opracowanie teorii i realizacja pierwszego obserwatora do estymacji bezpośrednio niemierzalnych zmiennych stanu w silnikach klatkowych (1980),
- Opracowanie i weryfikacja laboratoryjna oryginalnej teorii opisującej dynamikę silnika klatkowego na bazie kąta obciążenia i jej zastosowanie do wyjaśnienia zasad sterowania skalarnego i wektorowego (1994),
- Koncepcja i realizacja pierwszego napędu z silnikiem klatkowym, zasilanym z falownika prądu pracującego w systemie sterowania wektorowego bez czujnika pomiaru prędkości wału (1982-83),
- Opracowanie i realizacja nowych koncepcji bezpośredniej regulacji prądu, bazujących na metodzie wektorów przestrzennych dla trójfazowych przekształtników tranzystorowych,
- Pionierskie prace w zakresie teorii i wdrożenia sterowania wektorowego *DTC-SVM* (*Direct Torque Control – Space Vector Modulation*) falowników i prostowników tranzystorowych na bazie procesorów sygnałowych DSP, w tym przy zastosowaniu sieci neuronowych i neuronowo-rozmytych (2002),
- Nowatorskie rozwiązania układów bezkontaktowego zasilania energią elektryczną (2011).

Podsumowując dorobek naukowy Profesora Kaźmierkowskiego należy stwierdzić, że jest on imponujący i obejmuje ogółem około **400** publikacji (w tym ponad 250 w jęz. angielskim), na który składają się m.in. **5** monografii, **2** rozprawy, **4** podręczniki akademickie, oraz około

**140** artykułów w uznanych czasopismach naukowych. W jego dorobku naukowym znajdują się monografie wydane przez czołowe światowe wydawnictwa, takie jak *SpringerVerlag*, *Academic Press (USA)*, *CRC Taylor&Francis* czy *PWN-Elsevier*. Wiele swoich artykułów naukowych opublikował w uznanych prestiżowych czasopismach, takich jak *IEEE Transactions of Industrial Electronics*, *IEEE Transactions on Industry Applications*, *IEEE Transactions on Power Electronics* czy *IEEE Industrial Electronics Magazine*. W bazie WoS można znaleźć aktualnie 4883 cytowania jego prac, co tworzy indeks H równy 22.

Profesor M.P. Kaźmierkowski jest uczonym o uznanym międzynarodowym autorytecie. Był wielokrotnie (19-to krotnie) zapraszany w charakterze wizytującego profesora do uznanych uniwersytetów zagranicznych, takich jak *RWTH Aachen*, *Technische Universitat Darmstadt*, *Norwegian Institute of Technology (NTH) Trondheim*, *University of Aalborg*, *University of Minnesota*, *University of Tennessee*, *University of Reno/Nevada*, *Universita di Bologna*, *Universidad de Sevilla*, *Institute National Polytechnique Toulouse* czy *Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT)*. Kilkunastokrotnie wygłaszał referaty plenarne na uznanych konferencjach międzynarodowych na zaproszenie ich organizatorów. O wysokim uznaniu jego pozycji w świecie świadczy też udział i kierowanie licznymi badawczymi projektami międzynarodowymi. Kierował m.in. projektami w ramach 5. i 6. Programu Ramowego Unii Europejskiej czy projektami finansowanymi przez Fundację Marii Skłodowskiej-Curie realizowanymi w USA. Warto w tym miejscu podkreślić, że Profesor M. Kaźmierkowski jest nie tylko bardzo poważany ale także niezwykle lubiany w środowisku naukowym krajowym i za granicą dzięki okazywanej dużej życzliwości oraz gotowości do naukowej dyskusji i udzielania cennych wskazówek.

Profesor Marian Kaźmierkowski, jako twórca uznanej szkoły naukowej w zakresie elektroniki przemysłowej, energoelektroniki i automatyki napędu elektrycznego, wypromował 30 doktorów, wśród nich są pracownicy uniwersytetów zagranicznych, w Norwegii, Egipcie, Libii, uniwersytetów krajowych a także w instytutów badawczych, jak np. *ABB Research Centre* (Kraków) czy *Huentinger Elektronik* (Warszawa).

W dorobku badawczym Profesora duże znaczenie odgrywa współpraca z partnerami z przemysłu, czego wyrazem są prowadzone projekty przemysłowe i celowe, realizowane wspólnie m. in. z firmami zagranicznymi, np. *German Company BBC Manheim*, czy krajowa fabryka *APATOR* lub firma *TWERD*. Jest współautorem 16-tu patentów, 5-ciu wdrożeń oraz wielu ekspertyz i raportów opracowywanych dla różnych instytucji. Uzyskane przy udziale

Profesora wdrożenie do seryjnej produkcji pierwszych w kraju przekształtników tranzystorowych sterowanych wektorowo z wykorzystaniem procesorów sygnałowych uzyskało szereg nagród, m. in. w konkursie *Siemens* (2007) oraz wyróżnienie w konkursie *Polski Produkt Przyszłości* (2007).

Pan Profesor Marian Kaźmierkowski był pięciokrotnie uhonorowany nagrodą Ministra, w tym nagrodą indywidualną za całokształt dorobku w roku 2013, jest laureatem konkursu Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej „SUBSYDIA DLA UCZONYCH” w dziedzinie nauk technicznych w latach 2001 – 2004, jest laureatem nagrody *IEEE Industrial Electronics Society* w latach 2005 i 2008 a w roku 2017 otrzymał prestiżowe wyróżnienie: *IEEE Medal in Power Engineering*. Profesor Kaźmierkowski otrzymał tytuł Doktora *Honoris Causa* University of Aalborg w Danii w roku 2004, Institute National Polytechnique Toulouse we Francji w roku 2010, Uniwersytetu Zielonogórskiego w roku 2012 i Politechniki Białostockiej w roku 2017.

Na podkreślenie zasługuje bogata współpraca Profesora Kaźmierkowskiego z Politechniką Lubelską. Polegała ona m.in. na inspirowaniu i wspieraniu prac badawczych prowadzonych wspólnie z pracownikami Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Współpraca ta obejmowała także opracowanie szeregu recenzji rozpraw doktorskich oraz recenzji wydawniczych prac pracowników Politechniki Lubelskiej. Prof. M. Kaźmierkowski wielokrotnie prowadził wykłady i seminaria na Politechnice Lubelskiej. Współpraca przejawiała się również w realizacji wspólnych projektów badawczych oraz udziale Profesora w organizowanych przez Politechnikę Lubelską konferencjach i seminariach naukowych.

Mając na uwadze ogromny dorobek naukowy, dydaktyczny, osiągnięcia w zakresie rozwoju kadry, wysoką pozycję naukową oraz uznanie w kraju i na świecie a także zasługi dla rozwoju Politechniki Lubelskiej, w tym w szczególności dla Wydziału Elektrotechniki i Informatyki oraz wieloletnią owocną współpracę z tym Wydziałem, rekomenduję Senatowi Politechniki Poznańskiej wyrażenie pełnego poparcia dla przyznania Profesorowi Marianowi Piotrowi Kaźmierkowskiemu tytułu Doktora *Honoris Causa* Politechniki Lubelskiej.



## Politechnika Wrocławska

Rektor

Wrocław, 23 stycznia 2018 r.

R/0000/2622/2017

Prof. dr hab. inż. Piotr KACEJKO  
JM Rektor  
Politechniki Lubelskiej

Magnificencjo,

W załączeniu przesyłam opinię opracowaną przez prof. dr hab. inż. Teresę Orłowską-Kowalską o dorobku i działalności naukowej prof. Mariana Piotra Kaźmierkowskiego, w związku z inicjatywą nadania Profesorowi tytułu doktora honoris causa Politechniki Lubelskiej, wraz z uchwałą Senatu Politechniki Wrocławskiej zatwierdzającą tę opinię.

*Z wyrazami szacunku*

Łączę wyrazy szacunku,

  
Prof. Cezary Madryas



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Rektor Politechniki Wrocławskiej  
prof. dr hab. inż. Cezary Madryas

Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

T: +48 71 322 73 36  
+48 71 320 22 17  
F: +48 71 322 36 64

jmr@pwr.edu.pl



Politechnika Wrocławska

**Uchwała nr 361/16/2016-2020 Senatu PWr  
z dnia 18 stycznia 2018 r.  
w sprawie przyjęcia opinii o zasługach i dorobku Kandydata  
do tytułu doktora honoris causa Politechniki Lubelskiej**

*§ 1. Senat Politechniki Wrocławskiej, działając na podstawie § 9 ust. 2 pkt 24 Statutu, akceptuje opinię opracowaną przez prof. dr hab. inż. Teresę Orłowską-Kowalską, dotyczącą dorobku naukowego i zasług Pana Profesora Mariana Piotra Kaźmierkowskiego i wspiera inicjatywę Politechniki Lubelskiej zmierzającą do nadania Panu Profesorowi tytułu doktora honoris causa.*

*§ 2. Uchwała wchodzi w życie z dniem podjęcia.*

Przewodniczący Senatu  
Rektor Politechniki Wrocławskiej

Prof. dr hab. inż. Cezary Madryas

Prof. dr hab. inż. Teresa Orłowska-Kowalska  
Politechnika Wrocławska  
Wydział Elektryczny  
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

Wrocław, 7.01.2018r.

#### **OPINIA**

##### **o dorobku naukowym**

##### **Pana Profesora Mariana P. Kaźmierkowskiego**

w związku z postępowaniem o nadanie tytułu Doktora Honoris Causa  
Politechniki Lubelskiej

Opinię niniejszą opracowałam dla Senatu Politechniki Wrocławskiej  
na prośbę J.M. Rektora Politechniki Wrocławskiej, Prof. dr hab. inż. Cezarego Madryasa.

Prof. Marian Kaźmierkowski należy do grona najwybitniejszych elektrotechników polskich, znanych również szeroko za granicą. Jego specjalnością naukową jest elektronika przemysłowa, energoelektronika i automatyka napędu elektrycznego. Urodził się 5 października 1943 r. Jest absolwentem Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej z r. 1968, gdzie w roku 1972 obronił rozprawę doktorską, a następnie habilitacyjną (r. 1981), obie w specjalności automatyka. Tytuł profesora uzyskał w r. 1991. Od początku swojej kariery naukowej Profesor jest związany z Instytutem Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej. W Instytucie tym przeszedł wszystkie stopnie kariery akademickiej, od doktoranta, przez stanowisko adiunkta (w r. 1972), profesora nadzwyczajnego (1988) i zwyczajnego (od 1995 r.). W ciągu minionych czterdziestu lat pełnił w tym instytucie szereg funkcji organizacyjnych. Był Dyrektorem Instytutu w kadencjach 1987-90, 1993-96, 1996-99, 1999-2002, 2002-2005, 2005-2008 oraz pełnił funkcję Kierownika Zakładu Energoelektroniki Instytutu Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej w kadencjach 1993-96, 1996-99. W swojej aktywności na rzecz Politechniki Warszawskiej, profesor działał w Senacie tej uczelni i w Radzie Wydziału Elektrycznego, pracując jako przewodniczący lub członek różnych komisji, związanych głównie z działalnością naukową i dydaktyczną środowiska.

Profesor Kaźmierkowski od początku swojej działalności zawodowej współpracował w zakresie badań naukowych z Instytutem Elektrotechniki w Międzyzlesiu. W latach 1967-69 był zatrudniony na stanowisku asystenta w Zakładzie Przekształtników, a od 1996 jest zatrudniony jako profesor konsultant w Zakładzie Napędów Elektrycznych IEL. Pełnił funkcję przewodniczącego Rady Naukowej Instytutu Elektrotechniki w kadencjach 1998-2003 oraz 2003-2006; obecnie od r. 2015 jest Przewodniczącym tej Rady.

W latach 1980-82 był stypendystą Humboldta w TWTH Aachen (Niemcy), w tym samym uniwersytecie w ciągu następnych 2 lat realizował projekt badawczy. W latach 1985-86 pracował jako Visiting Professor w NTH Trondheim (Norwegia). W latach następnych był zapraszany również przez inne uniwersytety w Europie i USA jako Visiting Professor. University

of Minnesota, Minneapolis (USA) – 1989, University of Padova (Włochy) – 1993, University of Aalborg (Dania) 1995, 1997, 1998 oraz ENSEEIHT/LEEI Toulouse (Francja) – 2006.

Podstawową dziedziną specjalizacji naukowej Profesora Kaźmierkowskiego jest energoelektronika, obejmująca w szczególności:

- przekształtniki rezonansowe, techniki modulacji przekształtników dwu- i trójpoziomowych,
- prostowniki aktywne z sinusoidalnym prądem sieci i jednostkowym współczynnikiem mocy,
- zagadnienia sterowania predykcyjnego i neuronowego układów przekształtnikowych.

Drugą dziedziną zainteresowań Profesora jest automatyka napędu elektrycznego, obejmująca w szczególności zagadnienia:

- sterowania wektorowego i DTC napędów falownikowych z silnikami prądu przemiennego,
- sterowanie bezczujnikowe prędkości kątowej napędów indukcyjnych, w tym także dla pojazdów elektrycznych i komunikacji miejskiej.

W ostatnim okresie Profesor podjął badania:

- nad sterowaniem układami energoelektronicznymi sprzęgającymi odnawialne źródła energii z siecią elektroenergetyczną w warunkach występowania zakłóceń, indukcyjnych systemów zasilania bezstykowego (ang. Contactless Energy Transfer).

W tych trzech dziedzinach prof. Kaźmierkowski legitymuje się ogromnym dorobkiem publikacyjnym, który łącznie obejmuje ponad 400 pozycji, w tym ponad 250 w języku angielskim. Na szczególne wyróżnienie zasługuje 7 monografii (w tym 3 w jęz. angielskim), 10 podręczników akademickich, 5 rozdziałów monografii w jęz. ang., ponad 100 artykułów w renomowanych czasopismach z listy JCR (m.in. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, *IEEE Trans. on Power Electronics*, *IEEE Trans. on Industry Applications*, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, *IEEE Proceedings D*, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences*), ponad 120 referatów w materiałach międzynarodowych konferencji o uznanej renomie i kilkadziesiąt referatów na konferencjach krajowych. Wygłosił 14 zaproszonych referatów na konferencjach zagranicznych i 9 na konferencjach krajowych. Był współrealizatorem 8 tutoriali na konferencjach międzynarodowych oraz realizatorem 9 kursów dla studentów i doktorantów w różnych uczelniach europejskich.

Na uwagę zasługuje również działalność patentowa (16) prof. Kaźmierkowskiego, dokumentująca Jego osiągnięcia praktyczne, związane z pracami badawczymi w zakresie układów przekształtnikowych oraz napędów elektrycznych, realizowanymi głównie we współpracy z Instytutem Elektrotechniki w Międzyzlesiu. Wiele z tych prac zostało wdrożonych w przemyśle krajowym.

Profesor Kaźmierkowski kierował wieloma projektami badawczymi – krajowymi (KBN, MNiSW, FNP, NCBiR – łącznie 8) oraz 5 projektami międzynarodowymi (Maria Skłodowska-Curie Found II, NSF\_PAN Phare-SCI-TECH II, V i VI Program Ramowy UE), jak również projektami celowymi (5), grantami promotorskimi (7) oraz współuczestniczył w realizacji ponad 10 innych projektów badawczych i celowych.

Profesor współtworzył polską Szkołę Naukową Energoelektroniki, będąc w pierwszej kolejności uczniem i współpracownikiem, a następnie kontynuatorem działań innego wybitnego naukowca – prof. Henryka Tuni. Wychował liczną kadrę naukową – 30 wypromowanych

doktorów nauk technicznych, z których wielu uzyskało stopień doktora habilitowanego oraz tytuł profesora. Jego wychowankowie i uczniowie kontynuują dzieło Profesora, rozwijając energoelektronikę i automatykę napędu w takich ośrodkach naukowych w kraju, jak: Politechnika Warszawska, Lubelska, Rzeszowska, Akademia Morska w Gdyni, Instytut Elektrotechniki, oraz za granicą: TH Narvik – Norwegia, NTNU Trondheim – Norwegia, University in Zagazzy – Egipt, University in Bengazzy – Libia. Wychowankowie Profesora stanowią także kadre kierowniczą krajowych instytutów badawczych oraz centrów rozwojowych czołowych firm zagranicznych działających w kraju jak Centrum Badawcze ABB w Krakowie, czy Huettinger Electronic w Zielonce<sup>6</sup>/Warszawy.

Dzięki temu Zespół Naukowy kierowany przez prof. Kaźmierkowskiego rozwija z sukcesem współpracę z tymi instytucjami wykonując projekty badawcze, w tym także projekty dyplomowe. Daje to badaniom i edukacji inżynierskiej tak konieczny dynamizm i osadzenie w praktyce oraz naturalne wprowadzanie rozwiązań innowacyjnych. W chwili obecnej Profesor jest promotorem 5 otwartych przewodów doktorskich.

Poprzez recenzowanie prac naukowych (w tym: doktorskich - 30 razy w kraju oraz 26 za granicą, 17 rozpraw habilitacyjnych) oraz kontakty osobiste Profesor spowodował, że energoelektronika i automatyka napędu elektrycznego rozwijają się prężnie w Politechnice Białostockiej, Gdańskiej, Poznańskiej, Wrocławskiej, Rzeszowskiej, AGH, Uniwersytecie Zielonogórskim, Akademii Morskiej w Gdyni. Profesor Kaźmierkowski opracował 12 opinii wniosków o tytuł profesora w kraju i 21 opinii dla kandydatów z zagranicy.

Doświadczenia naukowo-badawcze Profesora Kaźmierkowskiego znalazło również odzwierciedlenie w Jego dorobku akademickim związanym z kształceniem nowych pokoleń elektrotechników, a w szczególności energoelektroników. Wypromował ponad 130 magistrów inżynierów i inżynierów.

Profesor jest autorem i współautorem znanych powszechnie i cieszących się ogromnym uznaniem 10 podręczników akademickich z zakresu elektroniki przemysłowej, w tym 2 wydanych za granicą („*Automatic Control of converter fed drives*” – wyd. Elsevier, 1987, „*Control in Power Electronics*” – Academic Press, USA, 2002).

Działalność Profesora w zakresie nauki i kształcenia kadr naukowych znalazła swoje odzwierciedlenie również w najwyższych gremiach naukowych w kraju. Pełnił funkcję członka Zespołu *T-10 Elektrotechniki, Energetyki i Miernictwa Interdyscyplinarnego KBN* (1996-99, 1999-2004), przewodniczącego Zespołu *Opiniodawczo-Doradczego ds. Działalności Statutowej i Inwestycji KBN* (2000-04). Od 1991 r. jest członkiem z wyboru Komitetu Elektrotechniki PAN, w latach 1999 – 2010 - przewodniczącym Sekcji *Energoelektroniki i Napędu Elektrycznego* Komitetu Elektrotechniki PAN. W r. 2007 został członkiem korespondentem PAN, w r. 2016 – członkiem rzeczywistym PAN. W latach 2011-2014 był członkiem Rady Kuratorów Wydziału IV Nauk Technicznych PAN, pełnił funkcję Dziekana Wydziału IV Nauk Technicznych PAN oraz był członkiem Prezydium PAN.

Wyrazem uznania środowiska naukowego jest również wybór do Rad Naukowych takich instytutów badawczych jak: *Instytut Elektrotechniki* w Międzylesiu (IEL), *Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów* (PIAP) Warszawa, *Instytut Tele i Radiotechniki* (ITiR), Warszawa,

*Instytut Technologii Materiałůw Elektronicznych (ITME), Warszawa. We wszystkich tych gremiach kandydat pełni aktywną rolę doradczą, natomiast w kadencji 2015-2019 jest Przewodniczącym Rady Naukowej Instytut Elektrotechniki w Międzyzlesiu (IEL).*

Prof. Marian Kaźmierkowski cieszy się również bardzo dużym prestiżem w środowisku międzynarodowym, czego dowodem jest m.in. wybór na Vice-Prezydenta w *IEEE Industrial Electronics Society* (1999-2001), na członka AdCom of the *IEEE Industrial Electronics Society* (2002-2005), a następnie Senior AdCom Member of the *IEEE Industrial Electronics Society* (2006-present). Ponadto w latach (2004-2006) Profesor został wybrany do pełnienia funkcji *Editor-in-Chief* w czasopiśmie *IEEE Transactions on Industrial Electronics* i następnie *Past Editor-in-Chief* w tym samym czasopiśmie (2006-2009). Od 1994 r. Profesor pełni funkcję *Associate Editor* w czasopiśmie *IEEE Transactions on Industrial Electronics* (1994-2006, 2010-), od 2010 – *Associate Editor of the IEEE Transactions on Industrial Informatics*, od 2007 – *Editor of the IEEE Industrial Electronics Magazine*, od 2004 – *Editor of the Journal of Power Electronics* (JPE - The Korean Institute of Power Electronics, Seoul, Korea), od 2000 – *Editor of the Acta Electrotechnica et Informatica* (Technical University of Kosice, Slovak Republic) i od 2007 – *Co-Editor of the Bulletin of the Polish Academy of Science, Technical Science* (Warszawa).

Od 1996 r. jest członkiem *Power Electronics and Motion Control Council (EPE-PEMC)* w Budapeszcie, a od 1999 r. – przewodniczącym *EPE-PEMC Award Committee* – od 1999 r. W r. 1994 został członkiem *Ad-Hoc Committee of the IEEE/Industry Application Society* ds. Rozwoju IEEE w krajach Europy Wschodniej, a w latach 2005-2006 był członkiem z wyboru *Nomination and Appointment Committee Regionu 8 IEEE*.

Jest ponadto stałym członkiem Komitetów Programowych kilku prestiżowych konferencji międzynarodowych, jak również wielokrotnie pełnił funkcję Przewodniczącego tych komitetów (m.in. *Power Electronics and Motion Control PEMC'94, IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE'96* oraz *ISIE'2011, IEEE EUROCON'2007*).

Za wybitne publikacje w renomowanych czasopismach (głównie IEEE) oraz działalność na forum międzynarodowym, prof. Kaźmierowski otrzymał szereg nagród i wyróżnień międzynarodowych, jak:

- IEE F.C. Williams Premium - the best paper 1989/89 published in the IEE Proceedings Part B (London, UK),
- Paper Award „Simulation and Experimental Study of Virtual Flux Based Direct Power Control for Three-Phase PWM Rectifiers” presented at the Conf. IEEE-IECON'2000 in Nagoya, Japan,
- Dr Eugene Mittelman Achievements Award – IEEE Industrial Electronics Society 2005 (USA),
- IEEE Industrial Electronics Society Anthony J. Hornfeck Service Award, 2007 (USA).

Profesor Kaźmierkowski w 1998 uzyskał godność *Fellow Grade of the IEEE, USA*, w 2001r. został członkiem *International Academy of Electrotechnical Sciences – Moscow, Russia*, a od 2010 r. – *Honorary Member of Hungarian Academy of Science*. W r. 2017 został odznaczony prestiżowym *IEEE Medal in Power Engineering*, jako jeden z 2 Polaków w historii tej organizacji.

Ukoronowaniem Jego uznania na forum międzynarodowym jest sá Doktoraty *Honoris Causa* przyznane Mu przez *University of Aalborg, Denmark* (23.10.2004) oraz *Institute*

National Polytechnique Toulouse (INPT), France (11.01.2010). Również w kraju, w roku 2012 Uniwersytet Zielonogórski, a w r. 2017 Politechnika Białostocka uhonorowały Go tytułem Doktora Honoris Causa.

Profesor Kaźmierkowski jest również laureatem 6 nagród indywidualnych i zespołowych Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za publikacje książkowe, Nagrody Badawczej Siemens'a 2007, nagród SEP i PTETiS za monografie i artykuły, kilkunastu nagród Rektora PW oraz laureatem konkursu FNP „Subsydia dla Uczonych” (2001-04).

Profesor wspierał rozwój naukowy i dydaktyczny pozawarszawskich ośrodków uczelnianych poprzez uczestnictwo w radach naukowych i udział w seminariach naukowych i dydaktycznych oraz konferencjach

W ramach swoich licznych kontaktów Prof. Kaźmierkowski współpracował również od wczesnych lat 90. z Politechniką Lubelską. W latach 1995-2016 opracował wiele różnych recenzji prac naukowych dla pracowników Wydziału Elektrotechniki i Informatyki. Był inicjatorem i głównym organizatorem seminariów dla doktorantów i dyplomantów Wydziału, w tym m.in. cyklicznego seminarium pn. „*Energoelektronika w Odnawialnych Źródłach Energii i Napędach - EwOZEiN*”, z których ostatnie odbyło się w r. 2016 w Lublinie.

Zaprezentowana w niniejszej opinii charakterystyka osiągnięć naukowego Profesora Mariana Kaźmierkowskiego jest z natury rzeczy lapidarna. Osiągnięcia i pozycja naukowa Profesora jest znana nie tylko w kraju, ale i poza jego granicami, o czym świadczą liczne zaproszenia do ośrodków naukowych na wykłady, recenzowanie prac na stopień i projektów badawczych w Europie i USA, przewodniczenie lub członkostwo wielu komitetów naukowych i konferencji o uznanej renomie w środowisku energoelektroników oraz szereg międzynarodowych nagród i wyróżnień.

Na zakończenie należy podkreślić cechy charakteru Profesora, jaką jest Jego życzliwość dla ludzi, otwartość na problemy środowiska oraz wspieranie swoją wiedzą i autorytetem poczyniń młodych badaczy. Cieszy się On szacunkiem i sympatią zarówno w krajowym jak i międzynarodowym środowisku naukowym, dla którego tak wiele dokonał w swojej działalności akademickiej.

Podsumowując stwierdzam, że **całość dorobku naukowego Profesora Mariana Piotra Kaźmierkowskiego, Jego pozycja i autorytet w krajowym i międzynarodowym środowisku naukowym w pełni uzasadnia nadanie Mu tytułu Doktora Honoris Causa Politechniki Lubelskiej.**

*Teresa Antoszek-Horobkiewicz*

## Politechnika Warszawska

REKTOR

Warszawa, dnia 25 stycznia 2018 r.

BR.540.1.2018.28

**Pan**

**prof. dr hab. inż. Piotr Kacejko**

Jego Magnificencja Rektor

Politechniki Lubelskiej

Magnificencjo Rektorze,

uprzejmie informuję, że Senat Politechniki Warszawskiej na posiedzeniu w dniu 24 stycznia 2018 roku, poparł inicjatywę nadania prof. dr. hab. inż. Marianowi Piotrowi Kaźmierkowskiemu tytułu doktora honoris causa Politechniki Lubelskiej.

W załączeniu przesyłam właściwą uchwałę Senatu Politechniki Warszawskiej oraz recenzję wspierającą autorstwa prof. dr. hab. inż. Lecha Grzesiaka.

Z wyrazami szacunku,

  
prof. dr hab. inż. Jan Szmidt



Plac Politechniki 1, 00-661 Warszawa  
tel.: 22 628 59 85, 22 234 72 20, fax 22 234 72 04  
e-mail: jmr@rekt.pw.edu.pl

Uchwała nr 170/XLIX/2018  
Senatu Politechniki Warszawskiej  
z dnia 24 stycznia 2018 r.

w sprawie poparcia inicjatywy nadania tytułu doktora honoris causa prof. dr hab. inż. Marianowi Piotrowi Kaźmierkowskiemu, przez Politechnikę Lubelską.

Na podstawie § 45 ust. 1 pkt 7 Statutu PW, w związku z wystąpieniem Senatu Politechniki Lubelskiej, uchwała się, co następuje:

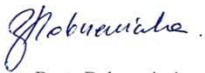
§ 1

Po zapoznaniu się z dorobkiem naukowym prof. dr hab. inż. Mariana Piotra Kaźmierkowskiego, Senat Politechniki Warszawskiej postanawia poprzeć inicjatywę nadania mu tytułu doktora honoris causa przez Politechnikę Lubelską.

§ 2

Uchwała wchodzi w życie z dniem podjęcia.

Sekretarz Senatu

  
mgr Beata Dobrzeniecka

Rektor

  
prof. dr hab. inż. Jan Szmidt

Prof. dr hab. inż. Lech M. Grzesiak  
Politechnika Warszawska  
Wydział Elektryczny

Opinia dotycząca wniosku Politechniki Lubelskiej w sprawie nadania tytułu i godności  
Doktora Honoris Causa prof. dr. hab. inż. Marianowi Piotrowi Kaźmierkowskiemu  
opracowana dla Senatu Politechniki Warszawskiej.

Jest dla mnie zaszczytem, że Senat Politechniki Warszawskiej powierzył mi przygotowanie opinii o dorobku zawodowym Profesora Mariana Piotra Kaźmierkowskiego. Jego osiągnięcia naukowe, dydaktyczne i organizacyjne są wybitne. W krajowym i międzynarodowym środowisku akademickim cieszy się wielkim uznaniem i szacunkiem. Profesor Marian P. Kaźmierkowski urodził się 5 października 1943 r. Studia rozpoczął w roku 1962 na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej. Po drugim roku przeniósł się do Warszawy kontynuując studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Tytuł zawodowy magistra inżyniera uzyskał w roku 1968. Stopień naukowy doktora w dyscyplinie elektrotechnika otrzymał w roku 1972. Stopień naukowy doktora habilitowanego także w dyscyplinie elektrotechnika nadała mu Rada Wydziału Elektrycznego w 1981 roku. Kolejne etapy kariery naukowej to uzyskane tytuły profesora nadzwyczajnego oraz profesora zwyczajnego odpowiednio w latach 1991 i 1995. Kariera zawodowa Profesora rozpoczęła się w 1967 roku, kiedy to podjął pracę w Instytucie Elektrotechniki na stanowisku asystenta naukowo-badawczego w Zakładzie Przekształtników. Najbardziej twórczy okres działalności Profesora wiąże się przede wszystkim z Politechniką Warszawską i Wydziałem Elektrycznym, gdzie odbył studia doktoranckie i następnie w roku 1972 został zatrudniony, w Instytucie Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, na stanowisku adiunkta, a następnie (1984-1985) na stanowisku docenta. Kolejne stanowiska to profesor PW, profesor nadzwyczajny i od 1995 profesor zwyczajny. Był Kierownikiem Zakładu Elektroniki Przemysłowej w kadencji 1993-1996. Przez 18 lat, zaczynając w roku 1987, pełnił funkcje Dyrektora Instytutu Sterowania i Elektroniki Przemysłowej. Od roku 1996 jest profesorem konsultantem w Zakładzie Napędów Instytutu Elektrotechniki w Warszawie, a w okresie od roku 2015 do 2017 pełnił funkcję Przewodniczącego Rady Naukowej IEL.

O uznaniu polskiego środowiska naukowego świadczy powołanie Profesora na Członka Korespondenta (2007), następnie na Członka Zwyczajnego (2016) Polskiej Akademii Nauk.

W kadencji 2011-2014 był Dziekanem Wydziału IV Nauk Technicznych Polskiej Akademii Nauk oraz Członkiem Prezydium PAN.

O prestiżu w krajowym środowisku naukowym świadczy także fakt udziału profesora M. P. Kaźmierkowskiego w pracach wielu radach naukowych instytutów naukowo-badawczych. Był lub jest członkiem rad naukowych: Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów w Warszawie, Instytutu Tele- i Radiotechniki w Warszawie, Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie, Instytutu Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej PAN.

Doświadczenia zawodowe zdobywał także prowadząc badania naukowe i wykłady na wielu uczelniach zagranicznych. W latach 1980-1981 był stypendystą Fundacji Alexandra von Humboldta, prowadząc badania naukowe w RWTH Aachen, kontynuowane przez kolejny rok na stanowisku Research Assistant. Pracował również na stanowisku Visiting Professor w Norwegian Institute of Technology w Trondheim w okresie 1986-1987.

Oprócz staży długoterminowych odbył 18 staży kilkumiesięcznych, na stanowiskach Visiting Professor, w wielu renomowanych uczelniach europejskich (Aalborg, Bolonia, Tuluza, Sewilla, Padwa) i uczelniach w USA (Knoxville, Minneapolis, Reno/Newada).

Nagrody, wyróżnienia i odznaczenia uzyskane przez Profesora M.P. Kaźmierkowskiego to lista zawierająca kilkadziesiąt pozycji.

Profesor Marian P. Kaźmierkowski otrzymał dotychczas dwa doktoraty honorowe zagraniczne nadane przez Uniwersytet w Aalborg, Dania (23.10.2004) oraz Institute National Polytechnic de Toulouse (INPT), Francja (11.01.2010).

Został także uhonorowany doktoratami honorowymi przez Uniwersytet Zielonogórski (4.06.2012) oraz Politechnikę Białostocką (25.05.2017)

O wysokiej pozycji naukowej Profesora w środowisku międzynarodowym świadczy fakt wyboru do następujących organizacji naukowych: IEEE - Fellow Member Grade - 1998; International Academy of Electrotechnical Sciences, Moskwa – 2001; Węgierskiej Akademii Nauk (honorowy członek zagraniczny) – 2010; IEEE Life Fellow - 2017.

Za działalność naukową i dydaktyczną uzyskał 28 nagród, przy czym należy wymienić najbardziej prestiżowe: Laureat Konkursu FNP „Subsydia Dla Uczonych” w dziedzinie nauk technicznych 2001-04; Laureat Nagrody Badawczej Konkursu Siemens za „Opracowanie teorii i wdrożenie do produkcji seryjnej typoszerzemu trójfazowych przekształtników tranzystorowych (1.5 - 315 kVA) ze sterowaniem wektorowym na bazie

procesorów sygnałowych", 2006; Nagroda Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za „całokształt dorobku", 2013.

Bardzo ważne są liczne wyróżnienia i nagrody międzynarodowe, z których najważniejsze to: Stypendium naukowe fundacji Alexander von Humboldt - RWTH Aachen 1980-82 (Germany); Nagroda F. C. WILLIAMS PREMIUM za najlepszy artykuł "Reduced-order observer with parameter adaption for fast rotor flux estimation in induction machine," opublikowany w IEE Proc. B Control Theory and its Applications - w roku akademickim 1988/89; Best Paper Award za artykuł „Simulation and Experimental Study of Virtual Flux Based Direct Power Control for Three-Phase PWM Rectifiers" na Konferencji IEEE-IECON, Nagoya (2000); Dr Eugene Mittelmann Achievements Award, IEEE Industrial Electronics Society, 2005; IEEE Industrial Electronics Society Anthony J. Hornfeck Service Award, 2008 (USA).

Szczególnie ważny jest przyznany w ubiegłym roku prestiżowy medal - **2017 IEEE Medal in Power Engineering** „For leadership in and pioneering contributions to the development of power electronic converters and electrical drive control systems".

Profesor Marian P. Kaźmierkowski otrzymał następujące odznaczenia krajowe: Srebrny Krzyż Zasługi - 11.08.1993; Złoty Krzyż Zasługi – 18.09.2001.

Działalność naukowa Profesora związana jest z obszarem energoelektroniki i automatyki napędu elektrycznego. W początkowym okresie prowadził prace związane ze sterowaniem adaptacyjnym napędami prądu stałego zasilanymi poprzez przekształtniki tyrystorowe. Następnie koncentrował się na badaniach dotyczących sterowania wektorowego w napędach z silnikami indukcyjnymi klatkowymi zasilanymi z falowników prądu i falowników napięcia. Kolejne ważne dokonania wiązały się z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji w sterowaniu napędami o ograniczonej liczbie czujników pomiarowych, oraz udoskonalania metod modulacji PWM. Najnowsze prace Profesora związane są z bezprzewodowymi układami przesyłania energii elektrycznej i wpisują się w bardzo ważny obszar działalności związanej z elektromobilnością. Kontynuowane są także prace dotyczące wykorzystania przekształtników o topologii wielopoziomowej w systemach energetycznych, a w szczególności systemach bazujących na odnawialnych źródłach energii.

Dokonania w tym obszarze działalności naukowej są imponujące. Profesor jest Autorem lub Współautorem 8 monografii i 7 rozdziałów w książkach wydanych w języku polskim lub angielskim oraz 4 podręczników akademickich. Opublikował 137 artykułów w czasopiśmie, w tym wiele w prestiżowych periodykach IEEE, oraz 183 referaty w materiałach konferencji krajowych i międzynarodowych.

Liczba cytowań w bazie WoS wynosi aktualnie 5040, a h-indeks = 22, w bazie Scopus 8164, h-index = 32, a w bazie Google Scholar 13257, h-index = 42. Te liczby wskazują na wysoką wartość naukową opublikowanych prac. Profesor M.P. Kaźmierkowski jest jednym z najwyżej notowanych w skali międzynarodowej uczonych, pod względem cytowań, w tym obszarze nauki.

Uzupełnieniem aktywności badawczej Profesora są uzyskane patenty (16).

Profesor M. P. Kaźmierkowski kierował 5 międzynarodowymi projektami badawczymi oraz 8 krajowymi. Był kierownikiem 7 projektów promotorskich. Uczestniczył jako główny wykonawca w kilkunastu innych grantach.

Profesor ma ogromne osiągnięcia we współpracy z przemysłem. Wykonał wiele ekspertyz i badań dla przemysłu, a zespół pod Jego kierunkiem wdrożył wyniki kilku prac badawczych uzyskując liczne wyróżnienia i dyplomy w kraju i za granicą.

Profesor Marian P. Kaźmierkowski wykazuje wysoką aktywność w obszarze kształcenia kadry. Wypromował dotychczas 30 doktorów i sprawuje opiekę nad 6 doktorantami.

Wykonał 12 recenzji wniosków o nadanie tytułu profesora, oraz 21 wniosków profesorskich dla uczelni zagranicznych. Uzupełnieniem jest wykonanie recenzji 18 rozpraw habilitacyjnych krajowych i zagranicznych, 30 rozpraw doktorskich krajowych oraz 26 rozpraw doktorskich zagranicznych.

Profesor Marian P. Kaźmierkowski recenzował także wiele wniosków o nadanie godności Doktora Honoris Causa co świadczy o szacunku i uznaniu jakim cieszy się w środowisku akademickim.

Nie mniej imponujące są dokonania Profesora M. P. Kaźmierkowskiego w obszarze dydaktyki.

W ramach projektu międzynarodowego Laboratorium Internetowego pt. Electrical Drives and Power Electronics pod kierunkiem M.P. Kaźmierkowskiego opracowano ważny i oryginalny moduł poświęcony nauczaniu nowoczesnych metod modulacji szerokości impulsów (ang. Pulse Width Modulation – PWM). Metody modulacji PWM są powszechnie stosowane w przekształtnikach energoelektronicznych.

Profesor M. P. Kaźmierkowski uczestniczył jako Profesor-koordynator w „International Danfoss Professor Programme” zorganizowanym w Institute of Energy Technology na Uniwersytecie w Aalborgu w latach 1997-2000. W trakcie realizacji Programu brał udział w opracowaniu materiałów dydaktycznych, w zakresie Energoelektroniki i Napędu Elektrycznego, zarówno dla studiów magisterskich jak też doktoranckich. Prowadził wykłady ze sterowania wektorowego napędów prądu przemiennego. Należy podkreślić, że

Uniwersytet w Aalborg prowadzi innowacyjny system studiów metodą problemową realizowany na bazie projektów semestralnych.

Z inicjatywy profesora M.P. Kaźmierkowskiego, został zorganizowany w 1997 roku Ośrodek Promocji Badań w zakresie Energoelektroniki spełniający wielowątkową rolę, kształcenia ustawicznego. W okresie swojej ponad 10-letniej działalności Ośrodek zorganizował cykl seminariów przemysłowych oraz specjalistyczne „Warsztaty” dla doktorantów i dyplomantów. Profesor M.P. Kaźmierkowski opracował i prowadził kilka cykli szkoleń w zakresie zastosowań sztucznych sieci neuronowych w energoelektronice i sterowania wektorowego napędów z silnikami indukcyjnymi.

W obszarze aktywności dydaktycznej międzynarodowej przygotował i poprowadził 18 „tutoriali” i zajęć typu „short courses”.

Działalność organizacyjna Profesora w wymiarze krajowym jak i międzynarodowym jest kolejnym dowodem wyjątkowej aktywności zawodowej. Jest członkiem w 16 prestiżowych organizacjach i stowarzyszeniach międzynarodowych. Organizował wiele konferencji międzynarodowych i był także członkiem licznych komitetów naukowych konferencji krajowych i międzynarodowych.

Szczególne dokonania Profesora są związane z działaniem w organizacji IEEE, gdzie pełnił wiele odpowiedzialnych funkcji.

Profesor M.P. Kaźmierkowski pełnił lub aktualnie pełni funkcje w komitetach redakcyjnych, wysoko cenionych, czasopiśmie międzynarodowych. Najważniejsze z nich to: Editor-in-Chief of the IEEE Transactions on Industrial Electronics (2004-2006); Past Editor-in-Chief of the IEEE Transactions on Industrial Electronics (2006-2011); Associate Editor of the IEEE Transactions on Industrial Electronics (1994-2006; 2010-); Editor of the IEEE Industrial Electronics Magazine (2007-); Associate Editor of the IEEE Transactions on Industrial Informatics (2010-); Editor of the Journal of Power Electronics (JPE) -The Korean Institute of Power Electronics, Seoul, Korea (2004-); Editor of the Acta Electrotechnica et Informatica, Technical University of Kosice, Slovak Republic (2000-).

Niemniej ważne są funkcje pełnione w następujących komitetach redakcyjnych polskich czasopism naukowych: Redaktor Serii Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki, Komitet Elektrotechniki PAN, (2008-11); Z-ca Redaktora Naczelnego czasopisma Bulletin of Polish Academy of Science: Technical Science, Warszawa (2008-); Przewodniczący Rady Programowej czasopisma Przegląd Elektrotechniczny (Electrotechnical Review), Warszawa (2004-); Członek Rady Programowej czasopisma Electronics (Elektronika), Warszawa (2005-); Członek Rady Programowej czasopisma

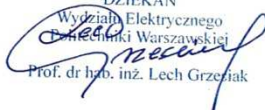
Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems JAMRIS, Wydawca PIAP, Warszawa (2005-); Członek Rady Programowej - Prace Instytutu Elektrotechniki, Warszawa (1996-).

Znam Profesora M.P. Kaźmierkowskiego od ponad czterdziestu lat, a przez kilkanaście lat pełniłem funkcję zastępcy dyrektora ds. nauki w Instytucie Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, kierowanym wówczas przez Profesora Mariana P. Kaźmierkowskiego. Tematyka prowadzonych przez Niego prac badawczych jest mi bliska i często spędzaliśmy długie godziny na dyskusjach o badaniach naukowych dotyczących energoelektroniki i napędu elektrycznego.

Działalność naukowa, dydaktyczna i organizacyjna jest wybitna i z całym przekonaniem mogę powiedzieć, że Pan Profesor Marian Piotr Kaźmierkowski zasługuje na wyróżnienie najwyższą godnością akademicką jaką jest tytuł doktora honoris causa.

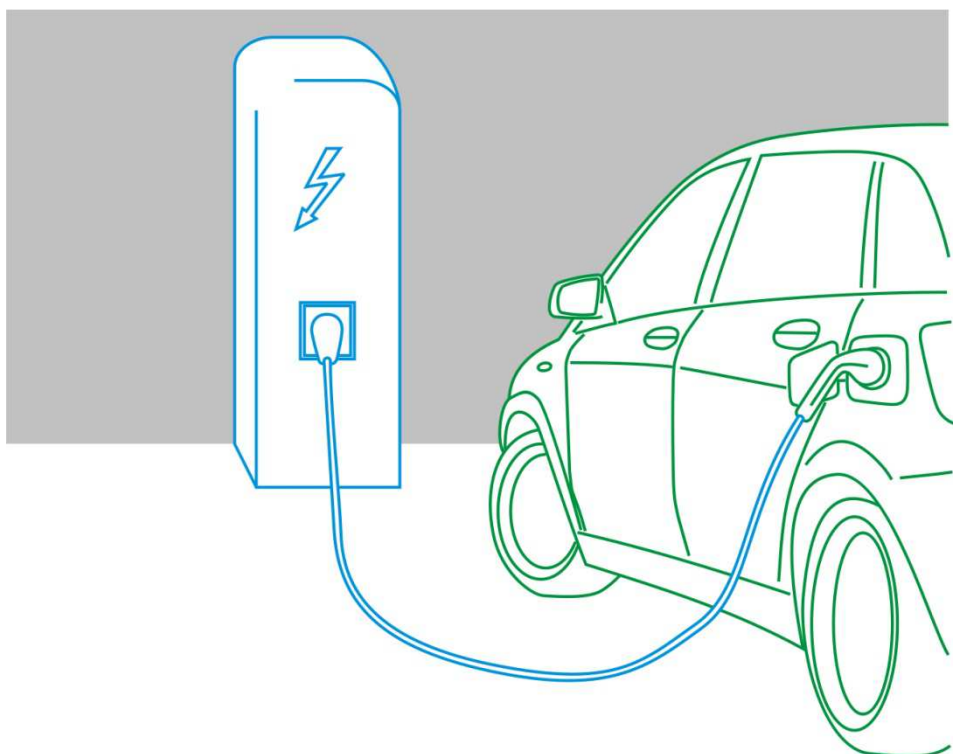
Jestem także przekonany, że spełnione są wszystkie warunki aby Wysoki Senat Politechniki Warszawskiej poparł wniosek o nadanie Profesorowi Marianowi Piotrowi Kaźmierkowskiemu tytułu Doktora Honoris Causa Politechniki Lubelskiej.

Warszawa 19-01-2018

DZIEKAN  
Wydziału Elektrycznego  
Politechniki Warszawskiej  
  
Prof. dr hab. inż. Lech Grzeźniak

**Marian P. Kaźmierkowski**

# **UKŁADY ENERGOELEKTRONICZNE W ELEKTROMOBILNOŚCI**



2018

*Udowodnione przykładami nigdy  
nie można uważać za całkowicie  
udowodnione.*

Gottfried W. Leibnitz

## 1. Wprowadzenie

Ostatnio Elektromobilność<sup>1</sup> jest przedmiotem szerokich badań i rozwoju zarówno na świecie jak też w kraju. Do ważniejszych czynników przemawiających na rzecz rozwoju pojazdów elektrycznych (ang. *Battery Electric Vehicle – BEV*) należą:

- brak spalin i hałasu,
- niski koszt eksploatacji w porównaniu do samochodów z silnikami spalinowymi (1:3),
- wysoka sprawność (silniki elektryczne >90%, spalinowe rzędu 35–40%),
- prosta konstrukcja napędu elektrycznego bez skrzyni biegów i sprzęgła,
- możliwość odzyskiwania energii w czasie hamowania i doładowywanie akumulatorów (zależnie od stylu jazdy od 5 do 20%),
- możliwość ładowania akumulatorów w okresach zmniejszonego zapotrzebowania na energię elektryczną (w nocy i w południe) – co obniża koszty.

Jednakże mimo znacznego postępu w technologii BEV wciąż istnieją ograniczenia w ich masowym stosowaniu. Należą do nich przede wszystkim:

- wysoka cena samochodów elektrycznych (około 30–50% wyższa niż jego odpowiednik z silnikiem spalinowym),
- niewielki zasięg na bazie jednego ładowania akumulatorów,
- długi czas ładowania akumulatorów,
- brak rozwiniętej infrastruktury do ładowania akumulatorów.

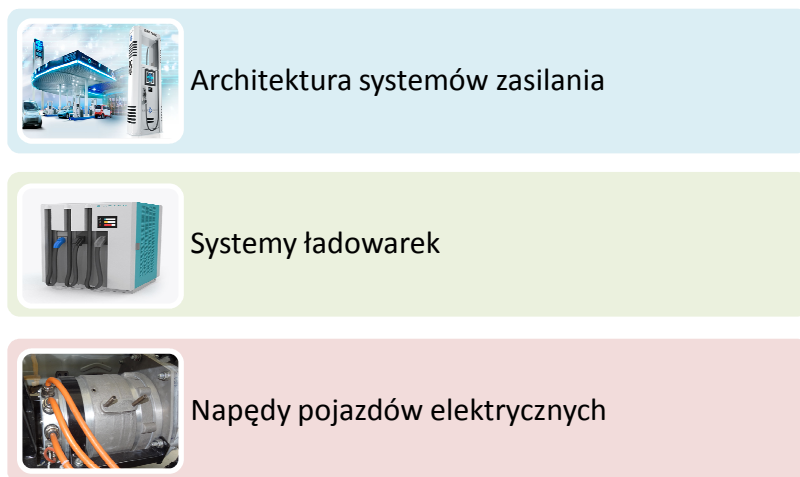
Wiele spośród tych problemów pomaga rozwiązać zaawansowana i nowoczesna energoelektronika. Dlatego też Energoelektronika<sup>2</sup> wkroczyła szeroko do

---

<sup>1</sup> Elektromobilność: to określenie ogólne odnoszące się zarówno do technicznych i eksploatacyjnych aspektów dotyczących pojazdów z napędem elektrycznym EV, technologii oraz infrastruktury ładowania, jak również kwestii społeczno-gospodarczo-prawnych związanych z projektowaniem, produkcją, nabywaniem i używaniem pojazdów elektrycznych.

<sup>2</sup> Energoelektronika: to dyscyplina w dziedzinie (obszarze) nauk technicznych zajmująca się wysokosprawnym przekształcaniem, sterowaniem i ulepszaniem energii elektrycznej przy zastosowaniu półprzewodnikowych elementów mocy (diody, tranzystory IGBT, MOSFET, tyrystory konwencjonalne, tyrystory GTO, etc.)

Elektromobilności w zakresie, który ogólnie można podzielić na trzy specyficzne działy (rys. 1): architektura systemów zasilania stacji ładowania (w szczególności ładowania ultraszybkiego), systemów samych ładowarek akumulatorów, regulowanych napędów elektrycznych z silnikami prądu przemiennego.



Rys. 1. Układy energoelektroniczne w Elektromobilności

Infrastruktura do ładowania pojazdów elektrycznych, jej koszty, dostępność i osiągi stanowią bardzo ważne czynniki, które bezpośrednio wpływają na płynność przejścia na Elektromobilność i mają szersze zastosowanie. Istnieją odmienne technologie ładowania pojazdów elektrycznych, normy, wymagania, różne podejścia technologiczne i różne poziomy ładowania (zarówno pod względem mocy, jak i czasu). W tabeli 1 przedstawiono klasyfikację i parametry oraz przyporządkowane rodzaje gniazd stosowanych aktualnie w terminalach ładowarek.

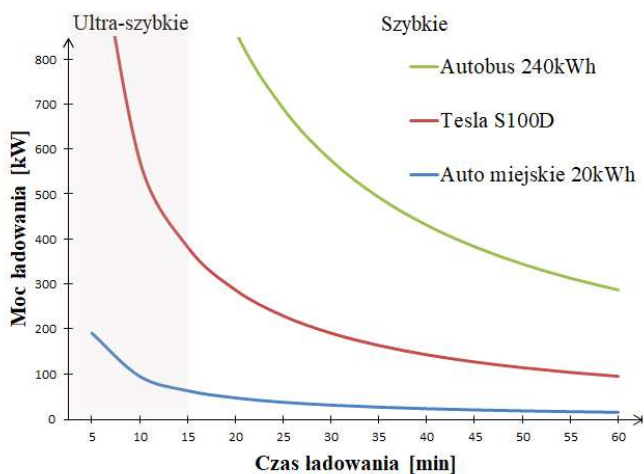
## 2. Architektura systemów zasilania stacji ładowania

### 2.1. Wymagana moc ładowania

Dla zapewnienia szybkiego i ultraszybkiego ładowania baterii akumulatorów BEV konieczna jest odpowiednio duża moc ładowarek, co wynika z podstawowych praw fizyki:  $P = E/t$ , gdzie:  $P$  – moc ładowarki w W,  $E$  – energia akumulatora w Wh,  $t$  – czas ładowania w godzinach  $h$ . Dlatego przykładowo do naładowania 80% baterii 100 kWh (samochód Tesla S 100D) w czasie 15 min. wymagana jest ładowarka o mocy rzędu 320 kW (rys. 2).

Tabela 1. Rodzaje terminali ładowania<sup>3</sup>

| Przyłącze sieciowe       |                          | Ładowanie<br>zwykłe<br>Sieć<br>1-fazowa                                           | Ładowanie<br>zwykłe<br>Sieć<br>3-fazowa                                           | Ładowanie szybkie<br>i ultraszybkie                                               |                                                                                    |
|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|                          |                          | $U=230V$ AC<br>$I=16A$<br>$P=3,7kW$                                               | $U=400V$ AC<br>$I=32A$<br>$P=22/43kW$                                             | $U=500V$ AC<br>$I=250A$<br>$P=220kW$                                              | $U=600V$ DC<br>$I=400A$<br>$P=240kW$                                               |
| Rodzaj gniazda zasilania |                          | Typ 2<br>Mennekes                                                                 | Typ 2<br>Mennekes                                                                 | CCS                                                                               | CCS<br>CHAdeMO                                                                     |
|                          |                          |  |  |  |  |
| Czas ładowania           | Pojemność<br>akumulatora | (A)                                                                               | (B)                                                                               | (C)                                                                               | (C)                                                                                |
|                          | 100 kWh                  | ca. 27 h                                                                          | 4,5/2,5 h                                                                         | ca. 30 min                                                                        | ca. 25 min                                                                         |
|                          | 40 kWh                   | ca. 11 h                                                                          | 60/120 min                                                                        | ca. 10 min                                                                        | ca. 10 min                                                                         |
|                          | 20 kWh                   | ca. 5,5 h                                                                         | 30/60 min                                                                         | ca. 5 min                                                                         | ca. 5 min                                                                          |
|                          | 10 kWh                   | ca. 3 h                                                                           | 15/30 min                                                                         | < 5 min                                                                           | < 5 min                                                                            |



Rys. 2. Wymagana moc ładowania w funkcji czasu naładowania do 80% pojemności baterii akumulatorów

<sup>3</sup> Według norm IEC 61851-1, VDE 0122-1

Jeżeli na publicznej stacji będzie przykładowo 10 punktów ładowania ultra-szybkiego, to jednocześnie ładowanie wymaga  $10 \times 320 \text{ kW} = 3,2 \text{ MW}$  mocy. Oczywiście jeszcze większe moce wymagane są w przypadku ładowania baterii autobusów elektrycznych lub ultra krótkich czasów ładowania ( $<5 \text{ min}$ ). Wymagany poziom mocy może nie być dostępny w każdej lokalizacji, szczególnie w obszarach o słabo rozwiniętych sieciach elektroenergetycznych lub w miastach o dużej gęstości rozmieszczenia stacji ładowania. Może także nie być optymalny w sensie wykorzystania dostępnej mocy. Dlatego aktualnie rozwijane są nowoczesne koncepcje architektury zasilania stacji ładowania z uwzględnieniem Odnawialnych Źródeł Energii – OZE oraz lokalnych magazynów (zasobników) energii.

## 2.2. Podstawowe topologie przekształtników energoelektronicznych

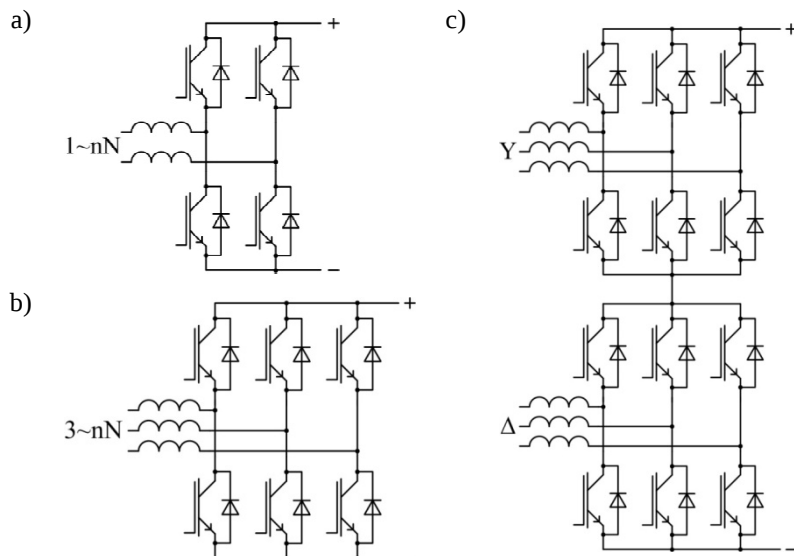
Przed prezentacją architektur systemów zasilania omówione zostaną podstawowe topologie przekształtników stanowiących ich główne części składowe. Ogólnie obejmują one dwie grupy: prostowniki aktywne AC-DC oraz przekształtniki prądu stałego DC-DC.

Na rys. 3 pokazano topologie prostowników aktywnych AC-DC, które dzięki zastosowaniu tranzystorów mocy (*IGBT – Isolated Gate Bipolar Transistor* lub ostatnio *MOSTEF SiC*) i filtrów biernych, a także odpowiednich systemów sterowania cyfrowego (*DSP – Digital Signal Processor*) zapewniają szereg ważnych zalet z punktu widzenia sieci zasilającej jak:

- Sinusoidalny kształt prądu pobieranego z sieci,
- Stanowią dla sieci odbiornik liniowy spełniający wymagania norm o niskim współczynniku zawartości harmonicznych ( $\text{THD}_i \leq 5\%$ ),
- Możliwość niezależnego sterowania przepływem mocy czynnej i biernej przy zapewnieniu wysokiej dynamiki sterowania,
- W szczególności możliwość pracy z jednostkowym współczynnikiem mocy, tzn. praktycznie bez poboru mocy biernej z sieci,
- Zapewniają dwukierunkowy przepływ energii pomiędzy stroną AC i DC.

W układach zasilania sieciowego, z wyjątkiem systemów małej mocy (rys. 3a), zazwyczaj stosowane są prostowniki aktywne trójfazowe (rys. 3b) oraz w zakresie większych mocy złożone układy 12-pulsowe zasilane z transformatora SN/nN z podwójnym uzwojeniem wtórnym  $\Delta$  i Y (rys. 3c). Łączniki tranzystorowe mogą być zastąpione tyrystorami GTO, które charakteryzują się mniejszymi stratami przewodzenia, jednakże z uwagi na niską częstotliwość łączeń wymagają dużych filtrów indukcyjnych. W grupie przekształtników napięcia

stałego DC-DC wyróżnia się układy nieizolowane (rys. 4) oraz układy izolowane transformatorem w.cz. (rys. 5).

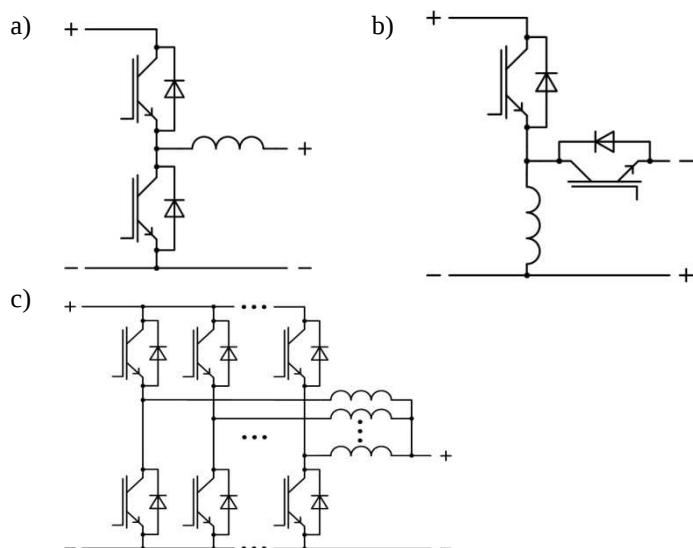


Rys. 3. Topologie dwukierunkowych prostowników aktywnych AC-DC: a) mostek jednofazowy, b) mostek trójfazowy, c) układ złożony 12-pulsowy

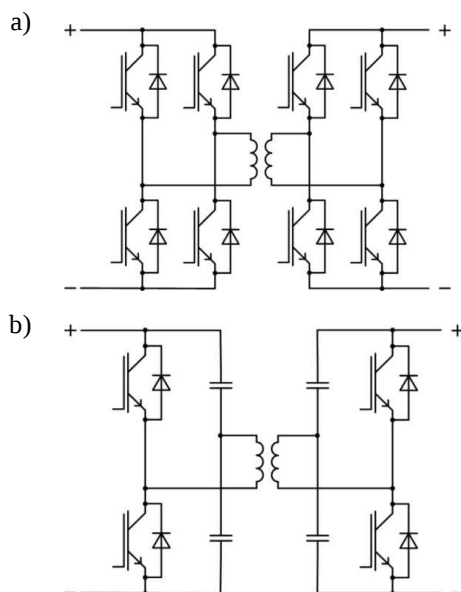
Jako końcowy przekształtnik napięcia stałego zasilany z szyny DC mogą być użyte wszystkie znane topologie np. obniżające, obniżająco-podwyższające, Cuk, SEPIC oraz ZETA zapewniające dwukierunkowy przepływ energii. Na rys. 4 przedstawiono trzy topologie najczęściej stosowane, przy czym wariant na rys. 4b generuje na wyjściu zmianę polaryzacji z „+” na „-” co nie zawsze jest pożądane.

Efektywnym rozwiązaniem, w szczególności w zakresie mocy powyżej 100 kW, jest podział przepływu energii na  $n$  identycznych sekcji. Redukuje to znacznie pulsacje prądu dzięki technice przesunięcia impulsów napięcia, a ponadto zapewnia wysoką sprawność rzędu 98,5% i łatwą optymalizację parametrów oraz wymiarów dzięki budowie modułowej.

Istnieje wiele topologii z transformatorem izolującym w.cz. Na rys. 5 pokazano dwie z nich. Jeśli dwa mostki są niezależnie modułowane, wówczas taka topologia nazywana jest DAB (ang. *Dual Active Bridge*) i zapewnia dwukierunkowy przepływ energii oraz możliwość pracy przy zmiennych zakresach napięcia strony pierwotnej i wtórnej, stanowiąc uniwersalne rozwiązanie. Ponadto można stosować technikę rezonansową zapewniającą redukcję strat łączeniowych w tranzystorach oraz zakłóceń elektromagnetycznych (ang. *EMI*). Stosowane są także wersje DAB trójfazowe.



Rys. 4. Topologie nieizolowanych przekształtników napięcia stałego DC-DC: a) przekształtnik obniżająco-podwyższający napięcie stałe Buck-Boost, b) przekształtnik obniżająco-podwyższający napięcie stałe Buck-Boost ze zmianą polaryzacji napięcia wyjściowego, c) układ modułowy (interleave).

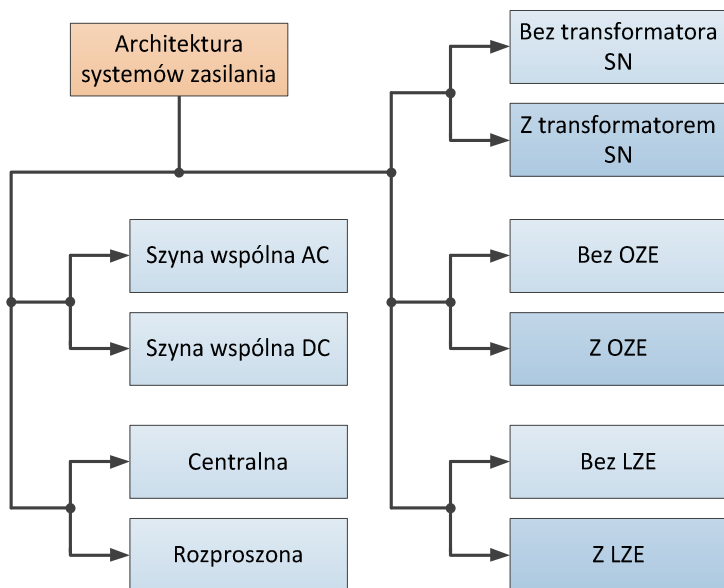


Rys. 5. Topologie dwukierunkowych przekształtników DC-DC z transformatorem izolującym w.cz.: a) układ mostkowy, b) układ półmostkowy

## 2.3. Przykładowe architektury zasilania

Architektura większości systemów zasilania może być charakteryzowana cechami wymienionymi na rys. 6.

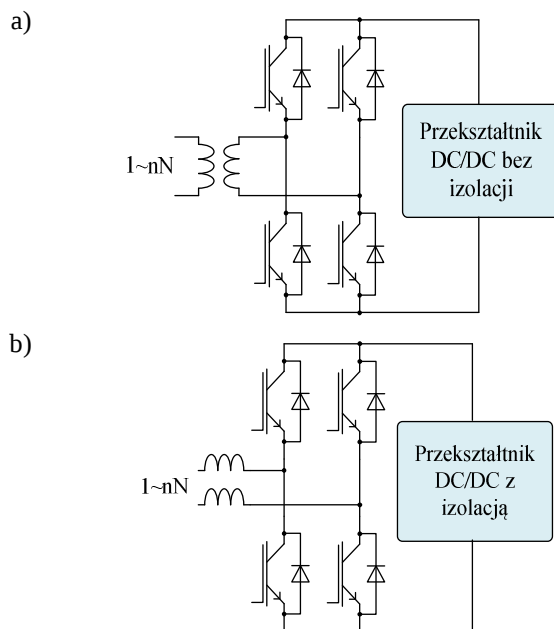
Wiele spośród stosowanych rozwiązań zawiera po kilka z wymienionych cech, dlatego ścisła klasyfikacja nie jest używana. Poniżej przedstawione zostaną wybrane przykłady systemów zasilania stacji ładowania.



Rys. 6. Cechy charakterystyczne klasyfikacji architektury systemów zasilania stacji ładowania. OZE – Odnawialne Źródła Energii, LZE – Lokalne Zasobniki Energii

### 2.3.1. Systemy zasilane z sieci nN (rys. 7)

Przy zasilaniu z sieci publicznej niskiego napięcia (nN) systemów ładowania małej mocy (Poziom (A) w tabeli 1) stosuje się układy jednofazowe (rys. 7). Przy czym w wersji z sieciowym transformatorem izolującym 50 Hz (rys. 7a) może być stosowany tańszy nieizolowany przekształtnik napięcia DC-DC (patrz np. rys. 5). Natomiast w wersji z rys. 7b) transformator izolujący jest umieszczony w przekształtniku DC-DC (rys. 5), co przy częstotliwości łączy rzędu 20 kHz i wyższych pozwala na znaczną redukcję jego ciężaru i gabarytów urządzenia. Dla ładowarek poziomu (B) z tabeli 1 mogą być stosowane identyczne architektury zasilania, ale z prostownikiem aktywnym trójfazowym w układzie mostkowym (rys. 3b).



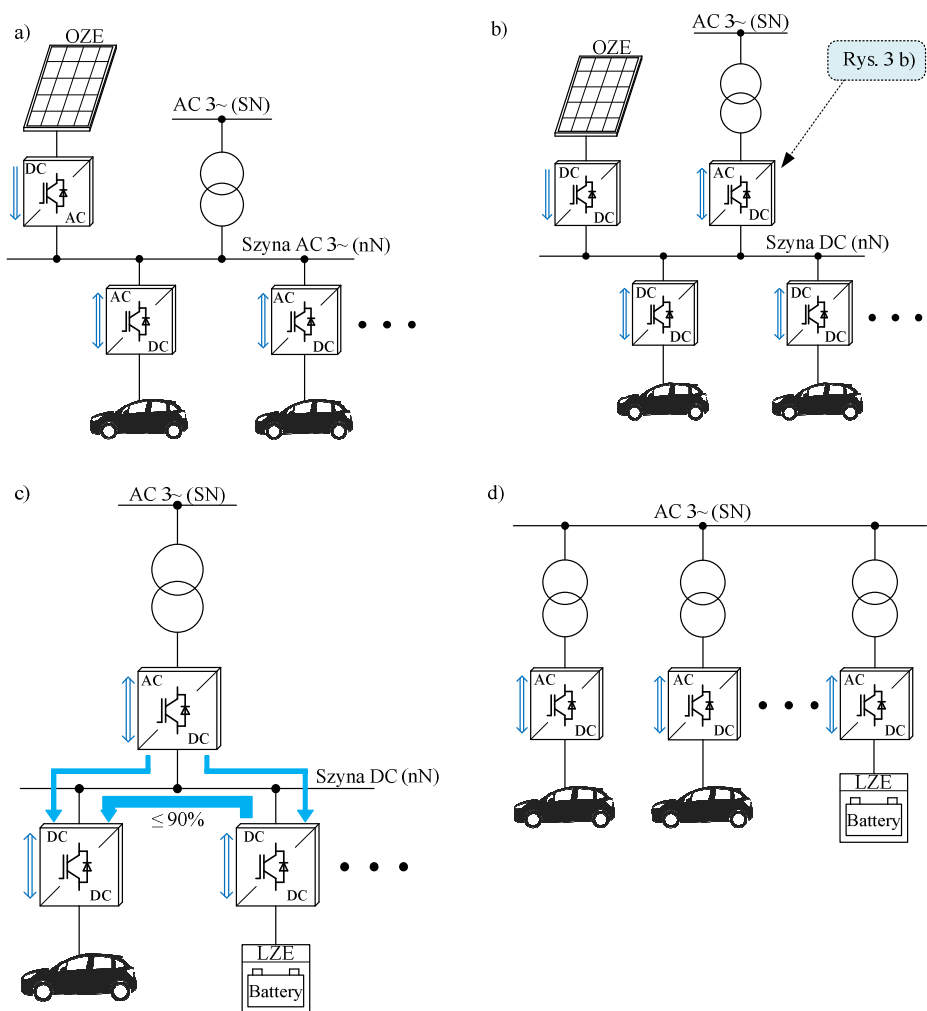
Rys. 7. Architektura zasilania jednofazowego z dwukierunkowym przekształtnikiem DC-DC: a) z transformatorem izolującym 50Hz po stronie sieci zasilającej, b) z transformatorem izolującym w.cz.

### 2.3.2. Architektura systemów zasilanych z sieci SN (rys. 8)

W systemach szybkiego i ultraszybkiego ładowania (poziom (C) w tabeli 1) klasycznie stosuje się transformator średniego napięcia SN/nN zasilający wspólną szynę prądu przemiennego AC (rys. 8a) lub prądu stałego DC (rys. 8b). Aktualnie wytwarzanie oraz przesył energii elektrycznej realizowane jest na bazie prądu przemiennego AC i energia jest rozprowadzana do odbiorców (oświetlenie, silniki elektryczne, urządzenia AGD, komputery, etc.) zasilanych z instalacji AC. Dlatego architektura zasilania systemów ładowania pojazdów BEV bazuje na wspólnej szynie AC dla umożliwienia zarządzania i rozdziału energii między systemy ładowarek, OZE oraz sieć elektroenergetyczną, jak to przykładowo ilustruje rys. 8a).

Energia elektryczna jest rozdzielana i sterowana poprzez odpowiednie dwukierunkowe prostowniki aktywne AC-DC, które mogą realizować także funkcję inteligentnych sieci umożliwiając zwrot energii z akumulatorów do sieci (funkcjonalność V2G – *Vehicle to Grid*). Ostatnio, dzięki rozwojowi energetyki rozproszonej oraz OZE, wzrosło zainteresowanie rozdziałem i zarządzaniem energią na bazie prądu stałego DC. W takiej architekturze, pokazanej na rys. 8c, jeden duży prostownik aktywny AC-DC o wysokiej sprawności dołączony po

stronie nN AC realizuje wspólną szynę zasilania napięcia stałego DC. Dlatego ładowarki BEV dołączone są przez dwukierunkowe przekształtniki napięcia stałego DC-DC, a nie jak w architekturze z szyną AC poprzez prostowniki aktywny AC-DC (rys. 8a). Ma to korzystny wpływ zarówno na całkowitą sprawność jak i koszty.



Rys. 8. Przykłady trójfazowych systemów zasilania: a) architektura centralna ze wspólną szyną prądu przemiennego AC, b) architektura centralna ze wspólną szyną prądu stałego DC, c) architektura centralna DC z lokalnym zasobnikiem energii LZE, oraz d) przykład architektury rozproszonej. Strzałki oznaczają kierunek przepływu energii w przekształtniku energoelektronicznym.

Jak wspomniano w sekcji 2.1, głównym problemem realizacji ultra szybkich stacji ładowania jest wielkość wymaganej mocy, jaka musi być dostarczona z sieci elektroenergetycznej do punktu ładowania. Dlatego na rys. 8c pokazano wersję architektury wyposażoną w lokalny zasobnik energii (superkondensatory, baterie elektrochemiczne, etc), który dołączony do szyny DC odciąża główną sieć AC. W tym systemie energia wymagana do ultra szybkiego ładowania akumulatorów BEV dostarczana jest zarówno z sieci przez prostownik aktywny AC-DC, jak też z zasobnika LZE przez przekształtnik DC-DC. Przy czym energia płynąca z sieci jest stała i znacznie mniejsza od wymaganej do ultra szybkiego ładowania. Dzięki temu aktywny prostownik sieciowy AC-DC może być wymiarowany na znacznie mniejszą moc znamionową.

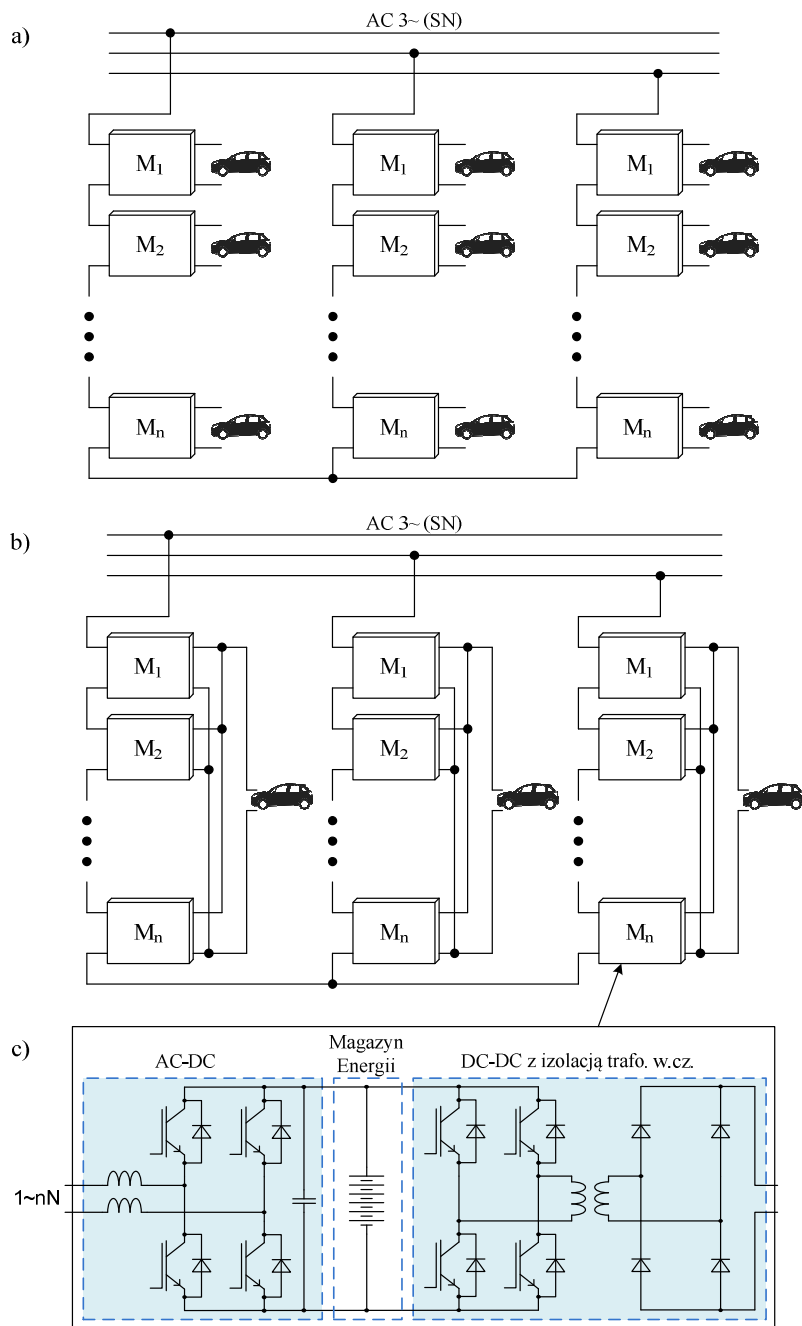
Przeciwstawną do architektury centralnej jest pokazana na rys. 8d architektura rozproszona. Jak widać bazuje ona na indywidualnych transformatorach sieciowych SN/nN, ale wymaga tylko jednego stopnia przekształcania energii w prostownikach aktywnych AC-DC. Wśród innych zalet architektury rozproszonej można wymienić: rozłożenie obciążenia sieci elektroenergetycznej, krótsze kable więc mniejsze straty, unifikacja i redundancja, wyższa niezawodność, niższe koszty dzięki efektowi skali.

### **2.3.3. Nowoczesna architektura zasilania bez transformatora SN/Nn z przekształtnikiem kaskadowym i lokalnymi zasobnikami energii (rys. 9)**

Ostatnio intensywnie rozwijane kaskadowe przekształtniki wielopoziomowe AC-DC oraz DC-AC charakteryzują się następującymi zaletami:

- Możliwość pracy przy średnich i wysokich napięciach (>1000 V),
- Redukcja zawartości harmonicznych dzięki zwielokrotnieniu częstotliwości napięcia wyjściowego względem częstotliwości łączy tranzystorów mocy (możliwość eliminacji wyjściowych filtrów biernych),
- Wysoka sprawność,
- Modułowa konstrukcja, większa niezawodność,
- Redukcja kosztów i gabarytów.

Dzięki tym zaletom przekształtniki kaskadowe znajdują zastosowanie w systemach dystrybucyjnych umożliwiając dołączenie do sieci średniego napięcia bez stosowania dużych, ciężkich i kosztownych transformatorów SN/nN. Wówczas problem zapewnienia izolacji galwanicznej zostaje przesunięty na poziom niskiego napięcia w przekształtnikach napięcia stałego DC-DC (rys. 5). Przykład takiej nowoczesnej architektury zasilania przedstawiono na rys. 9, przy czym w wersji a) wyjście każdego modułu może być dołączone bezpośrednio do pojazdu, natomiast w wersji b) wyjścia modułów, dla zwiększenia wydajności prądowej, połączone są równolegle redukując liczbę dołączonych pojazdów do trzech (po jednym na fazę).

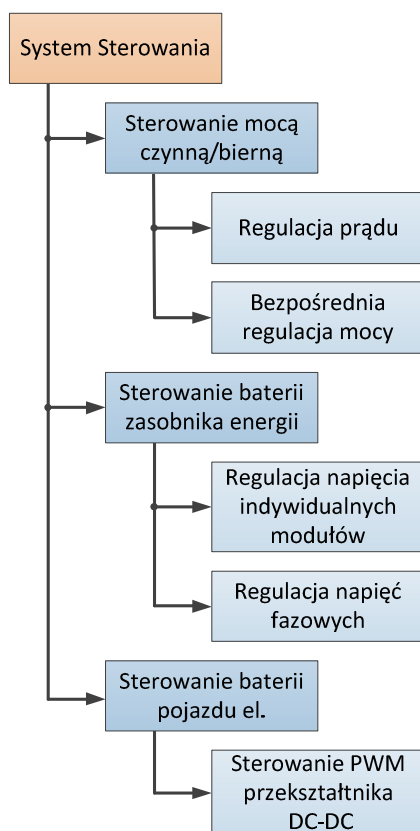


Rys. 9. Architektura zasilania bez transformatora SN/nN na bazie modułowego przekształtnika kaskadowego: a) z pojazdami ładowanymi z każdego modułu, b) z pojazdami ładowanymi z każdej gałęzi (fazy), c) topologia przekształtników każdego modułu

Każdy moduł (rys. 9c)) zawiera od strony sieci dwukierunkowy prostownik aktywny AC-DC połączony z zasobnikiem energii (np. baterie akumulatorów, superkondensatory) oraz na wyjściu izolowany przekształtnik napięcia stałego DC-DC.

Dla zapewnienia prawidłowej pracy omawianej architektury zasilania stacji ładowania stosuje się system sterowania hierarchicznego (rys. 10) składający się z trzech poziomów:

- sterowanie przepływem mocy czynnej i biernej,
- sterowanie wyrównania stanu naładowania (ang. *SoC* – *State of Charge*) baterii zasobnika energii,
- sterowanie procesem ładowania baterii akumulatorów pojazdu BEV.



Rys. 10. Hierarchiczne zarządzanie sterowaniem systemu zasilania z rys. 9

Pierwszy poziom sterowania przepływem mocy czynnej i biernej odbywa się w prostowniku aktywnym i może być realizowany w strukturze z podrzędną

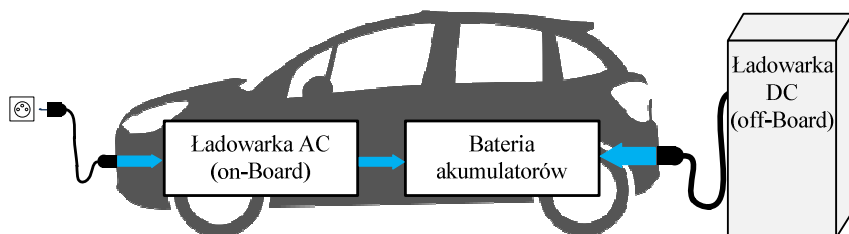
regulacją prądów (tzw. sterowanie napięciowo zorientowane) lub w strukturze bezpośredniej regulacji mocy (bez regulacji prądów). Drugi poziom podzielony jest na dwa podpoziomy: regulacja napięcia stałego DC przy ładowaniu i rozładowaniu baterii zasobnika energii każdego modułu oraz kontrola wyrównania napięcia wypadkowego DC na każdej z faz przekształtnika. Trzeci poziom, poprzez sterowanie napięcia i prądu wyjściowego przekształtnika DC-DC, realizuje strategię ładowania baterii pojazdu BEV.

### 3. Systemy ładowarek

#### 3.1. Wprowadzenie

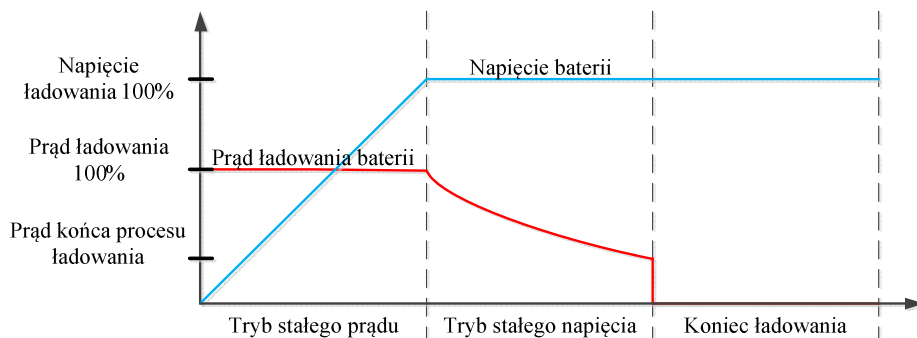
Współczesne ładowarki akumulatorów pojazdów elektrycznych BEV są urządzeniami energoelektronicznymi, które mogą być ulokowane zarówno w pojeździe (ang. *on-Board*) jak też poza nim (ang. *off-Board*), przeznaczonymi do zasilania baterii akumulatorów energią elektryczną dostarczaną z udostępnionej odpowiedniej architektury zasilającej (rys. 11).

Ładowarki *on-Board* mają zazwyczaj małą moc z uwagi na ograniczenia związane z wagą, gabarytami oraz kosztami i w efekcie wymagają długich czasów ładowania. Natomiast umieszczone poza pojazdem ładowarki *off-Board* nie mają ograniczeń związanych z wagą i gabarytami i dlatego mogą mieć większą moc zapewniając szybkie lub ultra szybkie ładowanie zarówno AC jak też DC (rys. 2).



Rys. 11. Ilustracja dwóch typów ładowarek akumulatorów BEV: umieszczonej na pojeździe (*on-Board*) oraz poza pojazdem (*off-Board*)

Niezależnie od wykonania, ładowarki muszą realizować odpowiednie algorytmy sterowania zapewniające kontrolę parametrów baterii i zapewnić ładowanie bezpieczne, sprawne, i kończące się w zalecany czas. Typowa idealna charakterystyka ładowania pokazana jest na rys. 12, na której występują trzy tryby:



Rys. 12. Typowa charakterystyka ładowania baterii akumulatorów litowych

- ładowanie prądem o stałej wartości (ang. *Constant Current CC*) przy napięciu niższym od wartości dopuszczalnej w danej temperaturze,
- ładowanie napięciem o stałej wartości (ang. *Constant Voltage CV*) malejącym prądem
- zakończenie procesu ładowania określone wartością prądu (np. C/8).

Najczęściej stosuje się ładowanie prądem określanym jako „1C”, którego wartość zapewnia w ciągu godziny przeniesienie ładunku elektrycznego równego pojemności akumulatora. Oczywiście w systemach ładowania szybkiego i ultra szybkiego prąd ładowania osiąga wyższe wartości do rzędu 5C. Z uwagi na rozrzut parametrów i zróżnicowanie warunków pracy poszczególnych ogniw składających się na baterię pojazdu BEV stosowane są układy monitoringu i kontroli w procesie ładowania i rozładowania (ang. *Battery Management System–BMS*) określające temperaturę, ładunek/napięcie i jego wyrównywanie, ograniczenie prądu rozładowania, pomiar impedancji wewnętrznej, etc.

## 3.2. Topologie ładowarek

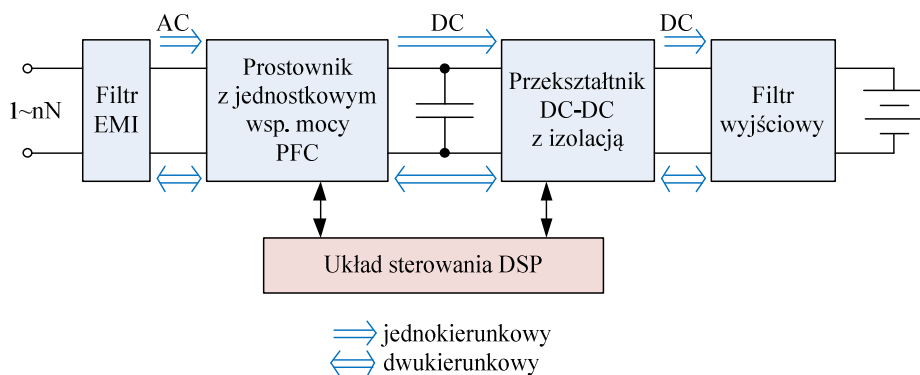
Możliwe są dwa rodzaje przepływu energii pomiędzy pojazdami BEV i siecią elektroenergetyczną, jak to pokazano na ogólnym schemacie blokowym ładowarki jednokierunkowej i dwukierunkowej (rys. 13).

### 3.2.1. Ładowarki jednokierunkowe

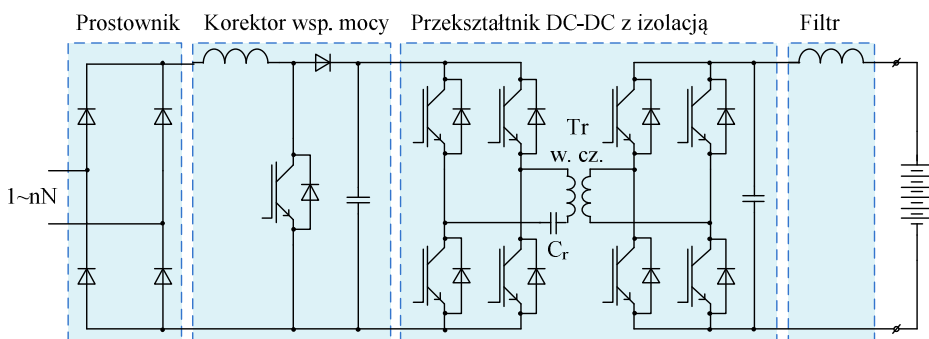
Ładowarki z prostownikami diodowymi mogą ładować akumulatory BEV, ale nie mogą zwracać energii do sieci. Te ładowarki zazwyczaj korzystają z mostka diodowego w połączeniu z filtrem i przekształtnikiem DC-DC. Aktualnie te przekształtniki są realizowane w jednym stopniu dla ograniczenia kosztów, masy, objętości i strat. Można także stosować transformatory izolujące

o wysokiej częstotliwości jeśli wymagana jest izolacja galwaniczna. Na rys. 14 przedstawiono taki układ jednokierunkowy zawierający diodowy prostownik mostkowy, układ korekcji współczynnika mocy (ang. *Power Factor Correction* – *PFC*) oraz izolowany przekształtnik DC-DC z falownikiem rezonansowym, transformatorem w.cz. oraz prostownikiem diodowym po stronie wtórnej.

Przy zapewnieniu kontroli prądu ładowania, ładowarki jednokierunkowe spełniają większość wymagań użyteczności przy jednoczesnym uniknięciu kosztów i kwestii bezpieczeństwa związanego z ładowarkami dwukierunkowymi.



Rys. 13. Schemat blokowy ładowarki jedno i dwukierunkowej

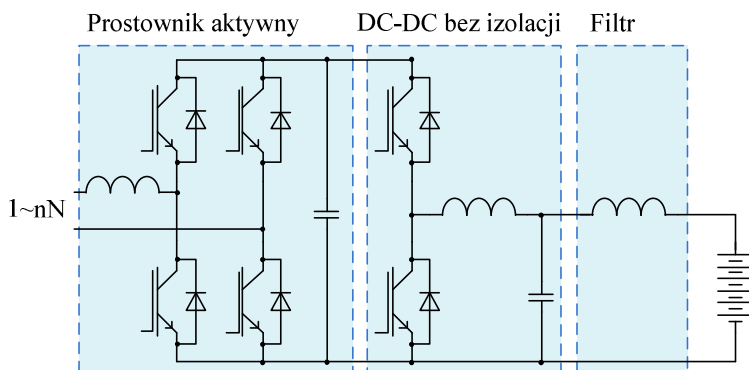


Rys. 14. Ładowarka jednokierunkowa z przekształtnikiem DC-DC z izolacją transformatorem w.cz.

### 3.2.2. Ładowarki dwukierunkowe

Typowa ładowarka dwukierunkowa ma dwa stopnie: aktywny prostownik sieciowy zapewniający pracę z jednostkowym współczynnikiem mocy oraz dwukierunkowy przekształtnik DC-DC do regulacji prądu baterii. Mogą być budowane w konfiguracji z izolowanym lub nieizolowanym przekształtnikiem DC-DC. Podczas pracy w trybie ładowania, pobierają prąd sinusoidalny o zdefi-

niowanym kącie fazowym dla kontroli przepływu mocy czynnej i biernej. W trybie rozładowania, ładowarka powinna zwracać również prąd w kształcie sinusoidalnym. Dwukierunkowa ładowarka realizuje zwrot energii akumulatora z powrotem do sieci (w funkcjonalności V2G) i stabilizację mocy.



Rys. 15. Ładowarka dwukierunkowa z nieizolowanym przekształtnikiem DC-DC

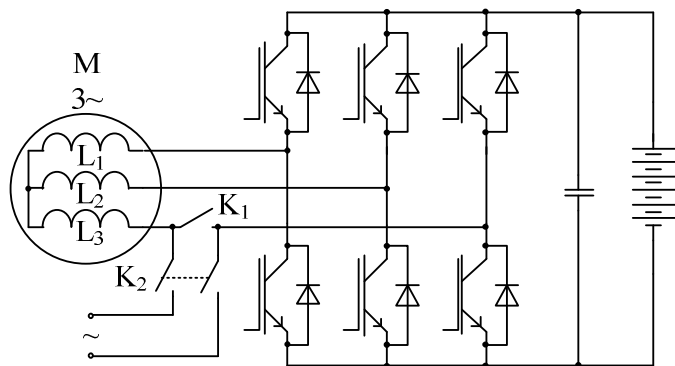
Przykładowa topologia pokazana na rys. 15, oprócz prostownika aktywnego, zawiera nieizolowany dwukierunkowy przekształtnik DC-DC. Posiada on tylko dwa tranzystory, co znacznie upraszcza obwody sterowania. Jednakże, dwa dławiki wysokoprądowe na wyjściu zwiększają gabaryty, ciężar i cenę. Przekształtnik DC-DC można zastąpić układem z izolacją w topologii DAB (rys. 5), co zwiększa gęstość upakowania energii, ale wymaga większej liczby tranzystorów mocy i skomplikowanego sterowania.

Oczekuje się, że ładowarki dwukierunkowe znajdą zastosowanie głównie w przypadku infrastruktury poziomej (B), ponieważ limity mocy i koszty na poziomie (A) są zbyt niskie. Natomiast na poziomie (C) podstawowym celem jest minimalizacja czasu ładowania (dołączenia) i dostarczania znacznej energii tak szybko, jak to możliwe.

### 3.3. Ładowarki zintegrowane

Aby zminimalizować wagę, objętość i koszt zaproponowano integrację funkcji ładowania z funkcją napędu elektrycznego. Obie funkcje można zintegrować tylko jeżeli ładowanie i jazda nie są jednocześnie. Przykład takiej prostej ładowarki zintegrowanej pokazano na rys. 16, gdzie jako dodatkowe komponenty występują tylko dwa styczniki K1 i K2, umożliwiające rekonfigurację układu podczas ładowania z trójfazowego falownika zasilającego silnik a podczas jazdy na jednofazowy prostownik mostkowy. Przy czym uzwojenia stojana silnika L1,

L2, L3 wykorzystywane są jako dławiki prostownika aktywnego, dzięki czemu zbędne są dodatkowe dławiki.

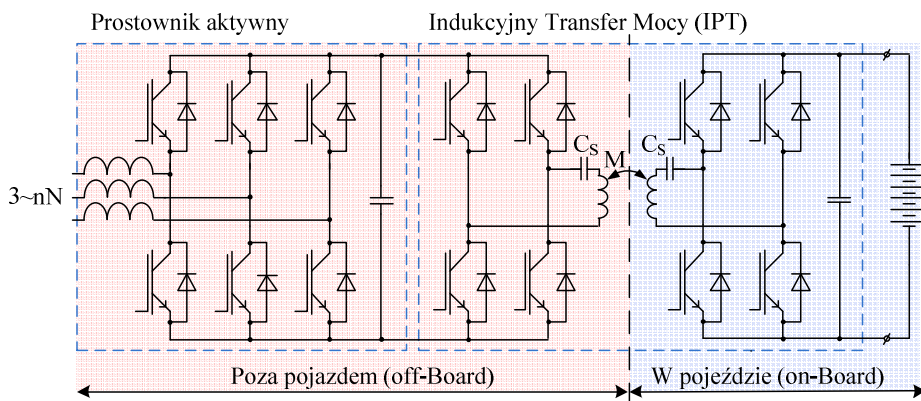


Rys. 16. Przykład ładowarki zintegrowanej z falownikiem zasilającym silnik indukcyjny

Jednakże moc silnika napędowego dobierana jest do warunków jazdy a nie ładowania. Dlatego średnia moc ładowania musi być ograniczona do poziomu mocy znamionowej silnika. Ogólnie, dla zwiększenia mocy ładowania wykorzystuje się bardziej złożone systemy, zawierające kilka silników lub/i falowników.

### 3.4. Bezstykowe ładowarki indukcyjne

W odróżnieniu do ładowarek konwencjonalnych wykorzystujących do doprowadzenia energii elektrycznej gniazda i wtyki, system zwany *Inductive Power Transfer* – IPT, wykorzystuje pole magnetyczne wokół uzwojenia pierwotnego z prądem o częstotliwości 20–100 kHz dla przesyłu energii do jednego lub kilku uzwojeń wtórnych - bezstykowo. Takie ładowarki indukcyjne osiągają wysoką sprawność tylko dla szczelin powietrznych dla których współczynnik sprzężenia magnetycznego wynosi  $k \geq 0.1$ . Dlatego typowo IPT pracują ze szczeliną powietrzną 1–40 cm osiągając moce rzędu do 200 kW i więcej [1]. W zakresie wyższych mocy stosuje się rdzeń dla zwiększenia sprzężenia magnetycznego, gdyż współczynnik  $k$  wzrasta proporcjonalnie do względnej przenikalności magnetycznej (100 do 1000 dla materiałów ferrytowych). Przykładowa topologia dwukierunkowej ładowarki indukcyjnej IPT opracowanej w Instytucie Elektrotechniki (IEL) w Warszawie, pokazana jest na rys. 17 [4].



Rys. 17. Dwukierunkowa ładowarka bezstykowa bazująca na indukcyjnym transferze mocy IPT

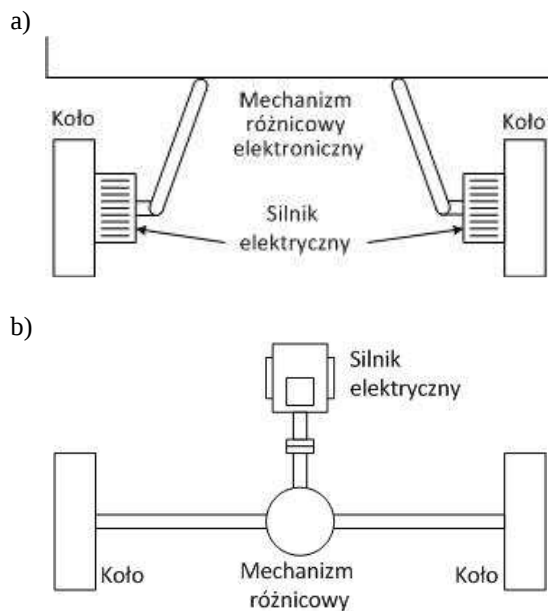
Dla redukcji strat na indukcyjnościach rozproszenia w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym zastosowano szeregowe pojemności kompensujące  $C_s$ . Dzięki temu układ pracuje w warunkach rezonansu, co dodatkowo pozwala na redukcję strat łączeniowych w wyniku przełączania tranzystorów i diod przy zerowym prądzie (ang. *Zero Current Switching – ZCS*) lub napięciu (ang. *Zero Voltage Switching – ZVS*). Dlatego ładowarki indukcyjne osiągają sprawność powyżej 90%. Podstawowe zalety to bezpieczeństwo, łatwość automatyzacji procesu ładowania, wygoda użytkowania oraz możliwość ładowania dynamicznego podczas ruchu pojazdu. Do wad należą skomplikowane projektowanie i wyższe koszty.

## 4. Układy napędowe

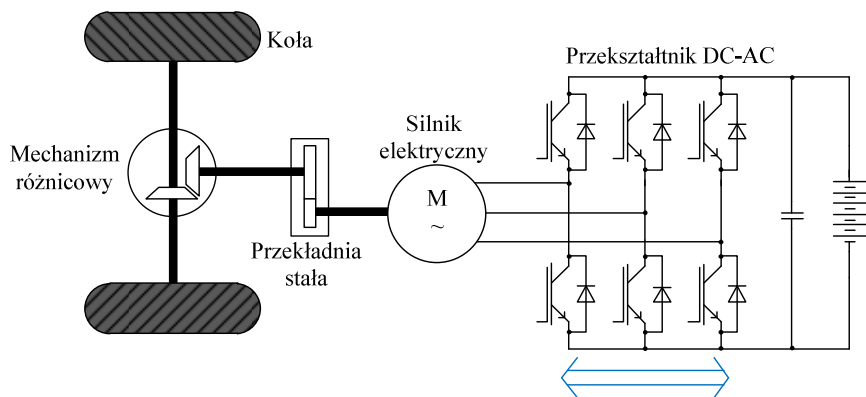
### 4.1. Wymagania ogólne i charakterystyki statyczne

Przeniesienie napędu z silnika elektrycznego na koła EV (rys. 18) realizowane jest na dwa sposoby: a) bezpośredni, gdy silnik umieszczony jest w kołach pojazdu, a mechanizm różnicowy jest elektroniczny oraz b) pośredni, gdy jeden silnik poprzez przekładnię stałą przekazuje moment na oba koła poprzez klasyczny mechanizm różnicowy.

Zgodnie z powyższym, pokazany na rys. 19, przykładowy układ napędowy pośredni składa się z następujących komponentów: z baterii akumulatorów, silnika elektrycznego oraz przekształtnika (falownika) tranzystorowego DC-AC sterowanego algorytmem realizowanym w DSP lub/i FPGA zapewniającym żądane charakterystyki i parametry napędu. Dodatkowo znajduje się przekładnia stała redukująca obroty silnika elektrycznego oraz mechanizm różnicowy rozdzielający moment napędowy na koła pojazdu.



Rys. 18. Napędy pojazdów EV: a) bezpośredni oraz b) pośredni



Rys. 19. Ogólna konfiguracja komponentów w pośrednim układzie napędowym BEV

W odniesieniu do napędu elektrycznego EV formułowane są następujące wymagania ogólne:

- szeroki zakres regulacji prędkości łącznie z obszarem osłabiania strumienia dla lepszego wykorzystania silnika,

- regulacja momentu o wysokiej dynamice dla zapewnienia doskonałych parametrów trakcyjnych oraz skutecznego działania systemu antypoślizgowego,
- duża przeciążalność momentem  $M_{maks}/M_N$ ,
- wysokie wartości stosunku momentu i mocy znamionowej do ciężaru i gabarytów,
- wysoka sprawność w całym zakresie regulacji prędkości obrotowych,
- niezawodność i możliwość (ograniczonego) użytkowania po wystąpieniu stanów awaryjnych.

Z danych przedstawionych w tabeli 2 wynika, że w popularnych samochodach BEV stosowane są wyłącznie silniki prądu przemiennego z wyraźną przewagą silników synchronicznych (PMSM oraz IPMSM) nad indukcyjnymi (IM). Wynika to z braku konieczności wzbudzenia, gdyż stosuje się magnesy trwałe (PM), dzięki czemu maleją straty i wzrasta sprawność oraz uzyskuje się duże gęstości mocy w stosunku do gabarytów i ciężaru. Jednakże, przy zoptymalizowanej konstrukcji i sterowaniu z minimalizacją strat, napęd z silnikiem indukcyjnym osiąga również wysoką sprawność, szczególnie w warunkach typowych cykli dynamicznych, przy zachowaniu ważnych zalet prostoty konstrukcji i niezawodności. Tym niemniej, trwają prace nad nowymi konstrukcjami a niektórzy producenci stosują nietypowe silniki, jak np. Renault Zoe silnik synchroniczny z uzwojeniem wzbudzenia (WRSM) czy BMW i3 silnik hybrydowy reluktancyjny z magnesami trwałymi (hPMSM).

Tabela 2. Dane napędu popularnych samochodów elektrycznych BEV

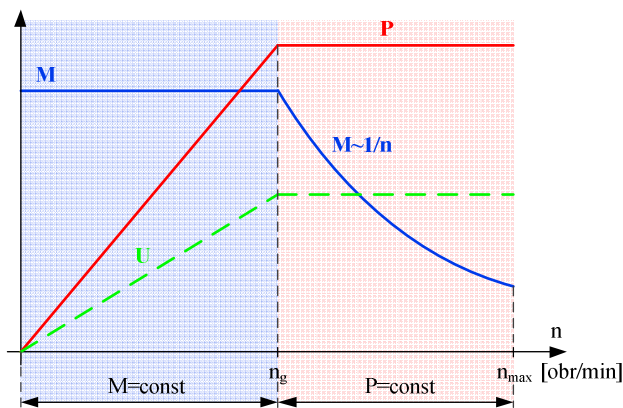
| Producent | Model    | Silnik rodzaj | Moment maks. | Moc | Prędkość maks. | Akumulator pojemność | Napięcie |
|-----------|----------|---------------|--------------|-----|----------------|----------------------|----------|
| -         | -        | -             | Nm           | kW  | obr/min        | kWh                  | V        |
| Nissan    | Leaf 18  | IPMSM         | 320          | 110 | 10 500         | 40                   | 360      |
| BMW       | i3       | hPMSM         | 250          | 125 | 11 400         | 22                   | 360      |
| Renault   | Zoe      | WRSM          | 220          | 65  | 11 300         | 22                   | 400      |
| VW        | e-Golf   | PMSM          | 270          | 85  | 12 000         | 24                   | 323      |
| VW        | e-Up!    | PMSM          | 210          | 60  | 12 000         | 18.7                 | 374      |
| Ford      | Focus EV | PMSM          | 250          | 107 | -              | 23                   | 350      |
| Fiat      | 500e     | PMSM          | 200          | 83  | 12 800         | 24                   | 364      |
| Tesla     | S60      | IM            | 430          | 283 | 16 000         | 60                   | 400      |
| Tesla     | S85D     | 2 x IM        | 658          | 193 | 16 000         | 85                   | 400      |
| Toyota    | RAV4 EV  | IM            | 370          | 115 | -              | 42                   | 386      |

Oznaczenia: IM – silnik indukcyjny, PMSM – silnik synchroniczny o magnesach trwałych, IPMSM – silnik PMSM z magnesami zagłębionymi, WRSM – silnik synchroniczny z uzwojeniem wzbudzenia, hPMSM – silnik PMSM hybrydowy.

Typowa charakterystyka mechaniczna trakcyjnego silnika prądu przemiennego pokazana jest na rys. 20. W pierwszej strefie regulacji od zera do prędkości  $n_g$

silnik pracuje z zachowaniem stałego stosunku  $U/(n \sim f)$ , co odpowiada stałej wartości strumienia stojana. Jest to tzw. strefa stałego momentu  $M = \text{const}$ .

Po osiągnięciu maksymalnego napięcia stojana (przy prędkości  $n_g$ ) musi być utrzymywana jego stała wartość, co przy dalszym wzroście prędkości prowadzi do osłabienia strumienia stojana i redukcji momentu  $M \sim (1/n)$ . Zakres ten, z uwagi na to, że  $P \sim M \cdot n = \text{const}$ , nazywany jest strefą stałej mocy.



Rys. 20. Charakterystyki statyczne traktoryjnego silnika prądu przemiennego z dwustrefową regulacją prędkości

W silnikach indukcyjnych wyróżniany jest jeszcze dodatkowy trzeci zakres regulacji z zachowaniem stałego poślizgu przy  $P \sim (1/n)$ , pozwalający na pracę w zakresie regulacji prędkości do 1:8 (znamionowa:maksymalnej).

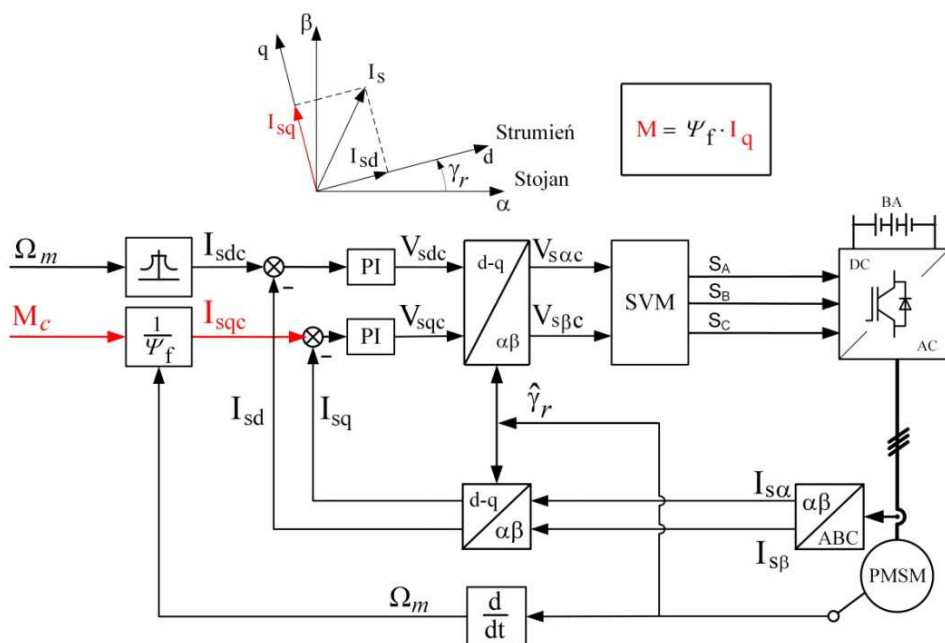
## 4.2. Metody sterowania momentu i strumienia

Charakterystyki statyczne i dynamiczne kształtowane są przez wybór odpowiedniej metody sterowania. W napędach trakcyjnych z silnikami prądu przemiennego stosowane są powszechnie metody sterowania wektorowego, uwzględniające w stanach dynamicznych oprócz zmian częstotliwości i amplitud, także zmiany przesunięć fazowych napięć, strumieni oraz prądów względem siebie. Pozwala to na uzyskanie szybkiej i niezależnej regulacji momentu i strumienia. Ta zasadnicza idea może być realizowana na wiele sposobów, tworząc całą gamę układów sterowania wektorowego. Poniżej przedstawiono trzy najbardziej reprezentatywne metody [2]: sterowanie polowo-zorientowane (ang. *Field Oriented Control* – FOC), bezpośrednie sterowanie momentu (ang. *Direct Torque Control* – DTC) oraz rozwijane ostatnio intensywnie metody sterowania predykcyjnego z modelem (ang. *Model Predictive Control* – MPC). Istotne jest, że mogą one być stosowane zarówno do regulacji silników synchronicznych

PMSM oraz IPMSM, a także silników indukcyjnych. Mając zapewnioną szybką regulację momentu można, dodając nadrzędny regulator PI, uzyskać stabilizację lub ograniczenie prędkości.

#### 4.2.1. Napęd z silnikiem synchronicznym PMSM sterowany metodą FOC

W metodzie FOC (rys. 21), niezależne sterowanie momentu i strumienia używa się poprzez zadawanie składowych prądu stojana w wirującym układzie współrzędnych d-q, zsynchronizowanym z wektorem strumienia wirnika, czyli w przypadku silnika PMSM strumienia magnesów  $\Psi_f$ . Składowa prądu  $I_{sd}$  jest proporcjonalna do amplitudy strumienia stojana i służy do jego osłabiania w drugiej strefie regulacji prędkości, a składowa  $I_{sq}$  jest proporcjonalna do momentu  $M_c$ . Mierzone składowe prądu stojana  $I_{s\alpha}$  oraz  $I_{s\beta}$  podlegają, w bloku transformacji współrzędnych  $\alpha$ - $\beta$ /d-q, przeliczeniu na wartości  $I_{sd}$  oraz  $I_{sq}$ , które następnie, po porównaniu z wartościami zadanymi  $I_{sdc}$  oraz  $I_{sqc}$ , generują sygnały uchybu regulacji doprowadzane do regulatorów PI.



Rys. 21. Układ sterowania momentu i strumienia silnika PMSM metodą polowo zorientowaną (FOC)

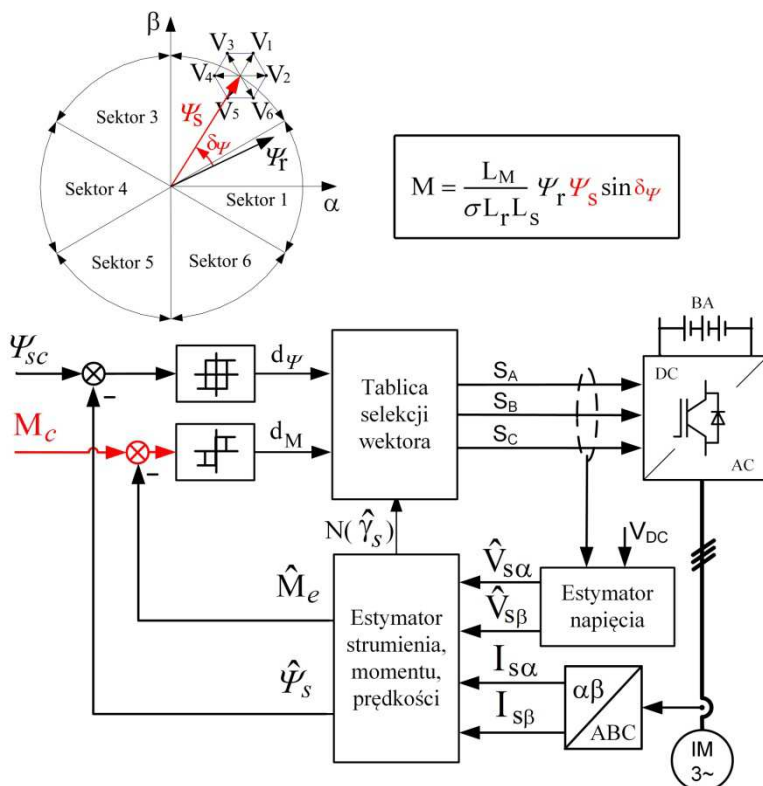
Regulatory prądów generują odpowiednio składowe napięcia  $V_{sdc}$  oraz  $V_{sqc}$ , które po transformacji d-q/ $\alpha$ - $\beta$  dostarczają wartości  $V_{sac}$  oraz  $V_{sbc}$  do modulatora szerokości impulsów SVM, zadającego impulsy sterujące tranzystorami prze-

kształtnika DC-AC (falownika). Dzięki zastosowaniu transformacji współrzędnych uzyskuje się odspłaszczenie i linearyzację torów regulacji momentu i strumienia, co pozwala na stosowanie liniowych regulatorów PI.

Wymagany do transformacji współrzędnych kąt położenia wirnika  $\gamma_r$  mierzony jest zazwyczaj przez umieszczony na wale silnika enkoder, albo obliczany w dodatkowym bloku estymacji na podstawie pomiaru napięć i prądów stojana.

#### 4.2.2. Napęd z silnikiem indukcyjnym sterowany metodą DTC

W odróżnieniu od metody FOC w układzie DTC nie stosuje się regulacji momentu i strumienia silnika za pośrednictwem połowo zorientowanych składowych prądu stojana, lecz bezpośrednio z zastosowaniem regulatorów histeryzycznych (rys. 22).



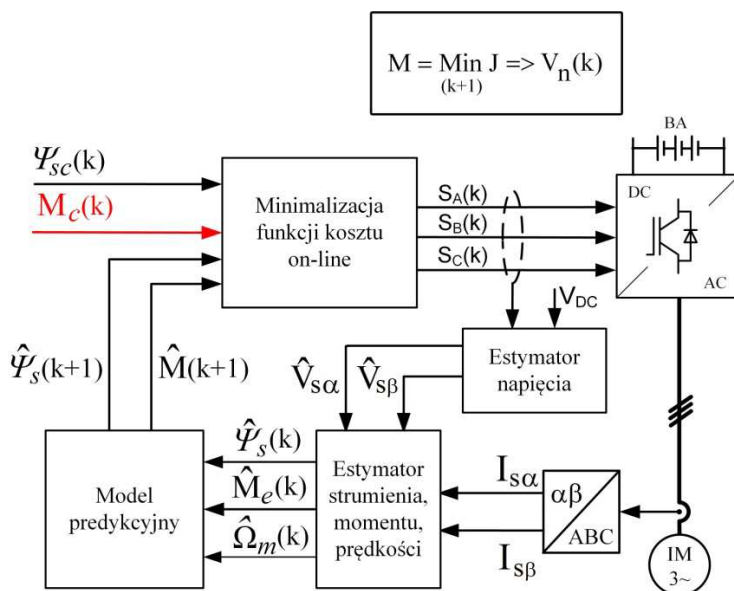
Rys. 22. Układ bezpośredniego sterowania momentu i strumienia silnika IM metodą DTC

Regulatory te na podstawie uchybów regulacji strumienia i momentu generują sygnały cyfrowe  $d_\psi$  oraz  $d_M$ , które doprowadzone, wraz z informacją o sektorze  $N(\Psi_s)$  napięcia falownika, do tablicy selekcji, decydują

o wyborze odpowiedniego wektora napięcia definiującego sygnały sterujące tranzystorami mocy w gałęziach  $S_A$ ,  $S_B$ ,  $S_C$ . Układ ponadto posiada blok estymacji momentu  $\hat{M}_e$  i strumienia  $\hat{\Psi}_s$  oraz – jeśli wymagane – także prędkości. Tak więc w układzie DTC sterowanie momentu, przy utrzymywaniu stałej amplitudy strumienia  $\Psi_s$ , odbywa się za pośrednictwem położenia strumienia stojana czyli kąta  $\delta_\psi$  zwanego kątem momentu. Metoda DTC należy do grupy nieliniowych i w swej podstawowej wersji nie wymaga informacji o położeniu lub prędkości wału silnika, a tylko numer sektora napięcia. Jest wyjątkowo prosta, a wybór szerokości histerezy regulatorów decyduje o częstotliwości łączeń tranzystorów falownika, która jest zmienna i generuje zakłócenia elektromagnetyczne EMI.

#### 4.2.3. Napęd z silnikiem indukcyjnym sterowany metodą predykcyjną MPC

Ostatnio dzięki rozwojowi procesorów o coraz większej wydajności obliczeniowej wzrosło zainteresowanie metodami sterowania predykcyjnego. Jest to algorytm (rys. 23), w którym na podstawie estymowanych wartości strumienia  $\hat{\Psi}_s(k)$ , momentu  $\hat{M}_e(k)$  oraz prędkości  $\hat{\Omega}_m(k)$ , dyskretny model predykcyjny obiektu (silnik + falownik) generuje wartości przewidywane  $\hat{\Psi}_s(k+1)$  i  $\hat{M}_e(k+1)$ .



Rys. 23. Układ regulacji momentu i strumienia silnika IM metodą predykcyjną (MPC)

Razem z odpowiednimi wartościami zadanymi  $\Psi_{sc}(k)$  oraz  $M_c(k)$  są one doprowadzane do bloku minimalizacji wartości funkcji kosztów, gdzie następują obliczenia wartości uchybu kolejno dla każdego z generowanych wektorów napięć falownika. Do sterowania wybierany jest ten wektor napięcia, który ma najmniejszą wartość funkcji kosztów. Ta procedura powtarzana jest w każdym okresie próbkowania.

Tabela 3. Podstawowe właściwości metod sterowania silników EV

|        | FOC                                                                                                                                                                                                                                    | DTC                                                                                                                                                                                                                            | MPC                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Zalety | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stała częstotliwość łączy – modulator</li> <li>• Unipolarne napięcie falownika</li> <li>• Małe straty łączeniowe</li> <li>• Niska częstotliwość próbkowania</li> </ul>                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Regulatory histerezy – wysoka dynamika</li> <li>• Niewrażliwość na zmiany parametrów wirnika</li> <li>• Brak regulatorów prądu</li> <li>• Brak transformacji współrzędnych</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Funkcja kosztów zastępuje regulatory momentu i strumienia</li> <li>• Optymalizacja on-line kilku zmiennych</li> <li>• Wysoka dynamika</li> <li>• Zmienna/stała częstotliwość łączy</li> <li>• Uwzględnia nieliniowości falownika i silnika</li> </ul> |
| Wady   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pośrednia regulacja momentu i strumienia</li> <li>• Regulatory prądu PI – niska dynamika</li> <li>• Transformacje współrzędnych</li> <li>• Wrażliwość na zmiany parametrów silnika</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zmienna częstotliwość łączy – brak modulatora</li> <li>• Bipolarne napięcie falownika</li> <li>• Zwiększone straty łączeniowe</li> <li>• Wysoka częstotliwość próbkowania</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Duża liczba obliczeń – silny procesor</li> <li>• Formułowanie funkcji kosztów</li> <li>• Dobór wag w funkcji kosztów</li> <li>• Dokładność i znajomość parametrów modelu predykcyjnego decyduje o właściwościach napędu</li> </ul>                    |

Takie podejście pozwala na bardzo elastyczny sposób projektowania, który objawia się zarówno w dowolności formułowania funkcji kosztów, jak też metod jej minimalizacji. Funkcja kosztów zawiera zazwyczaj uchyby wielkości regulowanych (momentu i strumienia), ale także ograniczenia nieliniowe amplitudy prądów, prędkości oraz takich parametrów, jak liczba lub częstotliwość łączy tranzystorów. Może także, poprzez wprowadzenie odpowiednich filtrów, kształtować rozkład widma harmonicznego napięcia i prądu stojana. Natomiast wybór metody minimalizacji funkcji kosztów ma najczęściej na celu redukcję liczby obliczeń on-line. Poszczególne składniki funkcji kosztów sumowane są z waga-

mi, których dobór nie jest zagadnieniem trywialnym i realizowany jest zazwyczaj metodą kolejnych prób. Ostatnio rozwijane są metody umożliwiające takie sformułowanie modelu predykcyjnego, aby wyeliminować wagi w funkcji kosztów, a także uzyskać zmienną lub stałą częstotliwość łączy [5].

#### 4.2.4. Porównanie metod sterowania momentu i strumienia

W tabeli 3 zestawiono podstawowe cechy omawianych metod sterowania momentu i strumienia silników prądu przemiennego synchronicznych PMSM oraz indukcyjnych IM dla napędów EV. O ile metody FOC i DTC zaliczamy do klasycznych i ich właściwości są doskonale rozpoznane, o tyle metody predykcyjne są ciągle rozwijane i ulepszone.

## 5. Zakończenie i wnioski

Aktualnie układy energoelektroniczne w zagadnieniach Elektromobilności rozwijane są w trzech głównych działach: architektura systemów zasilania stacji ładowania, ładowarki baterii akumulatorów oraz regulowane napędy z silnikami prądu przemiennego.

- W odniesieniu do architektury systemów zasilania, w szczególności dla terminali ultra szybkiego ładowania dużej mocy, wielopoziomowe przekształtniki kaskadowe stwarzają możliwość eliminacji niskosprawnych, ciężkich i dużych transformatorów SN/nN 50 Hz. Ponadto, rozwój architektury na bazie szyn zasilających prądu stałego DC jest zgodny z tendencjami rozwoju systemów energetyki rozproszonej i źródeł odnawialnych OZE i w przyszłości pozwoli na łatwiejszą integrację i sterowanie systemem energetycznym.
- Rozwój ładowarek energoelektronicznych zapewni poprawę jakości energii pobieranej z sieci dzięki powszechnemu stosowaniu prostowników diodowych z korekcją współczynnika mocy (PFC) lub prostowników aktywnych AC-DC dodatkowo umożliwiających dwukierunkowy przepływ energii (dla wykorzystania baterii akumulatorów BEV, jako rozproszonego magazynu energii V2G). Należy oczekiwać także dalszego rozwoju systemów ładowarek indukcyjnych zapewniających większe bezpieczeństwo i komfort, a także ładowarek zintegrowanych z napędem.
- W zakresie napędów elektrycznych dominują aktualnie silniki synchroniczne o magnesach trwałych PMSM charakteryzujące się wysoką sprawnością, ale konkurują z nimi silniki indukcyjne, które przy optymalizacji sterowania strumienia, w całym cyklu jazdy osiągają porównywalne

sprawności. Wśród metod sterowania silników obiecujące są rozwijane ostatnio metody sterowania predykcyjnego, które dzięki stosowanym algorytmom optymalizacji on-line stwarzają szeroki wachlarz możliwości oddziaływania na szereg parametrów i zabezpieczeń zarówno falownika jak i silnika napędowego.

Ogólnie w odniesieniu do układów energoelektronicznych w Elektromobilności należy oczekiwać, że stosowanie elementów półprzewodnikowych mocy nowej generacji na bazie materiałów SiC i GaN oraz topologii wielopoziomowych pozwoli na dalszą redukcję strat oraz ich gabarytów i ciężaru. Jednakże projektowanie takich systemów z uwagi na dużą liczbę nieliniowo powiązanych parametrów i zmiennych jest zagadnieniem skomplikowanym i wymaga użycia metod optymalizacji wielokryterialnej. Dlatego zdaniem autora tematyka ta stanowi interesujący temat przyszłościowych badań i rozwoju.

## Literatura

- [1] M. P. Kazmierkowski, A. J. Moradewicz, „Unplugged But Connected - Review of Contactless Energy Transfer Systems”, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 6, no 4, 2012, pp. 47-55.
- [2] M. P. Kazmierkowski, L. G. Franquelo, J. Rodriguez, M. Perez, J. I. Leon: „High Performance Motor Drives. Development of New Converter Topologies”, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 5, No. 3, 2011, pp. 6-26.
- [3] J. Rodriguez, M. P. Kazmierkowski, J. R. Espinoza, P. Zanchetta, H. Abu-Rub, H. A. Young, C. A. Rojas, „State of the Art of Finite Control Set Model Predictive Control in Power Electronics”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 2, 2013, pp. 1003-1016.
- [4] R. M. Miśkiewicz, „Contactless Supply Systems with Bidirectional Energy Flow”, PhD-Thesis, Electrotechnical Institute (IEL), Warsaw, Poland, 2017, (Promotor: M. P. Kazmierkowski).
- [5] D. Stando, „Sensorless Optimal Switching Sequence Predictive Flux Control of 3 – Level Inverter – Fed Induction Motor Drive”, PhD-Thesis, Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej – Instytut Elektrotechniki (IEL), Warszawa, 2018, (Promotor: M. P. Kazmierkowski).

## Spis treści

|                                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Uchwała Nr 8/2018/II Senatu Politechniki Lubelskiej<br>z dnia 15 marca 2018 r. w sprawie nadania<br>prof. dr hab. inż. Marianowi Piotrowi Kaźmierkowskiemu<br>tytułu Doktora Honoris Causa Politechniki Lubelskiej .....                                                                  | 3  |
| 2. Dyplom Doktora Honoris Causa .....                                                                                                                                                                                                                                                        | 4  |
| 3. Laudacja z okazji nadania<br>prof. dr hab. inż. Marianowi Kaźmierkowskiemu<br>godności Doktora Honoris Causa Politechniki Lubelskiej<br>wygłoszona przez Dziekan Wydziału Elektrotechniki<br>i Informatyki Politechniki Lubelskiej<br>prof. dr hab. inż. Henrykę Danutę Stryczewską ..... | 5  |
| 4. Pismo JM Rektora Politechniki Poznańskiej<br>prof. dr hab. inż. Tomasza Łodygowskiego .....                                                                                                                                                                                               | 10 |
| 5. Uchwała Nr 73/2016-2020 Senatu Akademickiego<br>Politechniki Poznańskiej z dnia 31 stycznia 2018 r.<br>w sprawie zaopiniowania wniosku Politechniki Lubelskiej .....                                                                                                                      | 11 |
| 6. Opinia prof. dr hab. inż. Krzysztofa Zawirskiego<br>dla Senatu Politechniki Poznańskiej w sprawie nadania<br>prof. dr hab. inż. Marianowi P. Kaźmierkowskiemu<br>tytułu Doktora Honoris Causa Politechniki Lubelskiej .....                                                               | 12 |
| 7. Pismo JM Rektora Politechniki Wrocławskiej<br>prof. dr hab. inż. Cezarego Madryasa.....                                                                                                                                                                                                   | 16 |
| 8. Uchwała nr 361/16/2016-2020 Senatu PWr<br>z dnia 18 stycznia 2016 r. w sprawie przyjęcia opinii<br>o zasługach i dorobku Kandydata do tytułu<br>Doktora Honoris Causa Politechniki Lubelskiej .....                                                                                       | 17 |
| 9. Opinia prof. dr hab. inż. Teresy Orłowskiej-Kowalskiej<br>o dorobku naukowym<br>prof. dr hab. inż. Mariana P. Kaźmierkowskiego<br>w związku z postępowaniem o nadanie tytułu<br>Doktora Honoris Causa Politechniki Lubelskiej .....                                                       | 18 |

10. Pismo JM Rektora Politechniki Warszawskiej  
prof. dr hab. inż. Jana Szmidta ..... 23
11. Uchwała nr 170/XLIX/2018 Senatu Politechniki Warszawskiej  
z dnia 24 stycznia 2018 r. w sprawie poparcia inicjatywy  
nadania tytułu Doktora Honoris Causa  
prof. dr hab. inż. Marianowi Piotrowi Kaźmierkowskiemu,  
przez Politechnikę Lubelską..... 24
12. Opinia prof. dr hab. inż. Lecha M. Grzesiaka  
dotycząca wniosku Politechniki Lubelskiej  
w sprawie nadania tytułu i godności Doktora Honoris Causa  
prof. dr hab. inż. Marianowi P. Kaźmierkowskiemu  
opracowana dla Senatu Politechniki Warszawskiej ..... 25
13. Wykład Doktora Honoris Causa Politechniki Lubelskiej  
prof. dr hab. inż. Mariana Piotra Kaźmierkowskiego:  
*Układy Energoelektroniczne w elektromobilności* ..... 31