

AUTOREFERAT – DR INŻ. LESZEK JARZĘBOWICZ

I. Imię i nazwisko

Leszek Jarzębowicz

II. Uzyskane stopnie naukowe i tytuły zawodowe

1. **Magister inżynier** (2005 r.) – Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki.

Złota odznaka absolwenta PG za ukończenie studiów z oceną celującą.

2. **Doktor nauk technicznych** (2010 r.) – Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki.

Tytuł rozprawy: *„Sterowanie trakcyjnym silnikiem synchronicznym z magnesami zagłębionymi w wirniku bez pomiaru wielkości mechanicznych”*.

Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Karwowski, prof. nadzw. Politechniki Gdańskiej.

Recenzenci: dr hab. inż. Andrzej Pochanke, prof. nadzw. Politechniki Warszawskiej,
prof. dr hab. inż. Janusz Nieznański, prof. zw. Politechniki Gdańskiej.

Rozprawa wyróżniona na III Ogólnopolskim Konkursie "Młodzi Innowacyjni 2011" organizowanym przez Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP.

III. Przebieg zatrudnienia w jednostkach naukowych

1. Od 1.10.2009 r. do 30.09.2010 r.:
asystent – Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki,
Katedra Inżynierii Elektrycznej Transportu
2. Od 1.10.2010 r.:
adiunkt – Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki,
Katedra Inżynierii Elektrycznej Transportu

IV. Wskazanie osiągnięcia naukowego wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. Z 2016 r. poz. 1311.)

1) Tytuł osiągnięcia naukowego:

Osiągnięcie naukowe uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora stanowi cykl publikacji powiązanych tematycznie zatytułowany:

Trakcyjne układy napędowe z silnikami prądu przemiennego – wybrane aspekty modelowania i sterowania.

2) Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe:

Poniższa lista zawiera 12 publikacji, w tym 7 samodzielnych oraz 5 współautorskich. Wśród przedstawionych prac jest 8 artykułów w czasopiśmie, w tym 6 indeksowanych w bazie *Web of Science*; pozostałe 4 prace to referaty konferencyjne.

Prace przedstawiono w odwrotnej kolejności chronologicznej. Oznaczenia prac są zbieżne z przyjętymi w *Wykazie dorobku habilitacyjnego* (Załącznik nr 3). Wartości współczynnika Impact Factor (IF) oraz liczbę punktów MNiSW podano zgodnie z rokiem wydania danej publikacji. Deklaracje udziału współautorów w pracach niesamodzielnych zamieszczono w Załączniku nr 5.

Summaryczny współczynnik IF przedstawionych prac to 12,995 (uwzględniając udział procentowy habilitanta: 11,963).

Suma punktów MNiSW prac będących osiągnięciem naukowym to 210 (uwzględniając udział procentowy habilitanta: 182,5).

- [IB1] Jarzębowicz L. ^(100%), *Derivation of motor mean phase currents in PMSM drives operating with low switching-to-fundamental frequency ratio*. Power Electronics and Drives, Vol. 4 (39), **2019**, pp. 1–8.
Publikacja w czasopiśmie z listy B MNiSW.
Liczba punktów MNiSW: 6 (na liście MNiSW czasopismo umieszczono pod poprzednią nazwą: „Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej”, ISSN 1733-0718).
- [IB2] Jarzębowicz L. ^(100%), *Impact of Low Switching-to-Fundamental Frequency Ratio on Predictive Current Control of PMSM*. Proc. 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED). Moscow, Russia, Jan 31 – Feb 02, **2018**.
Publikacja w materiałach konferencyjnych dostępnych w bazie *IEEE Xplore*.
Liczba punktów MNiSW: 0.
- [IB3] Jarzębowicz L. ^(100%), *Errors of a Linear Current Approximation in High-Speed PMSM Drives*. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 32, Issue 11, Nov **2017**, pp. 8254–8257.
Publikacja w czasopiśmie z listy *Web of Science – Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)*.
Wskaźnik IF₂₀₁₇: 6,812. Liczba punktów MNiSW: 45.
- [IB4] Jarzębowicz L. ^(90%), Opaliński A. ^(10%), *Frequency and time domain characteristics of digital control of electric vehicle in-wheel drives*. Archives of Electrical Engineering, 66 (4), **2017**, pp. 829–842.
Publikacja w czasopiśmie z listy *Web of Science – Emerging Sources Citation Index (ESCI)*.
Liczba punktów MNiSW: 15.
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu przeglądu literatury, sformułowaniu problemu i celu badawczego, opracowaniu modelu symulacyjnego użytego do weryfikacji, opracowaniu wyników dla modeli oznaczonych jako A2, A3, D1 i D2, zestawieniu i przedyskutowaniu wszystkich wyników, zredagowaniu większości tekstu. Mój udział szacuję na 90%.
- [IB5] Jarzębowicz L. ^(100%), *Modelowanie zmienności prądów szybkoobrotowego silnika PMSM oparte na dyskretnej danych pomiarowych*. XIII Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym "SENE 2017", Łódź, 22–24.11.2017 r.
Publikacja w materiałach konferencyjnych.
Liczba punktów MNiSW: 0.
- [IB6] Jarzębowicz L. ^(85%), Mirchevski S. ^(15%), *Modeling the impact of rotor movement on non-linearity of motor currents waveforms in high-speed PMSM drives*. Proc. 19th European Conference on Power Electronics and Applications EPE'2017 ECCE Europe. Warsaw, Poland, Sep 11–15, **2017**.
Publikacja w materiałach konferencyjnych dostępnych w bazach *IEEE Xplore* oraz *Web of Science Conference Proceedings Citation Index-Science (CPCI-S)*.
Liczba punktów MNiSW: 15.
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu przeglądu literatury, sformułowaniu celu badawczego, opracowaniu i omówieniu proponowanego modelu symulacyjnego, wykonaniu badań eksperymentalnych i opracowaniu ich wyników, zredagowaniu większości tekstu. Mój udział szacuję na 85%.

- [IB7] Cisek M. ^(50%), Jarzębowicz L. ^(50%), *Synchronizacja komutacji tranzystorów z położeniem kątowym wirnika silnika w napędzie IPMSM z blokowym sterowaniem falownikiem*. Przegląd Elektrotechniczny 9/**2017**, s. 69–73.
Publikacja w czasopiśmie z listy B MNiSW, w czasie publikacji czasopismo nie było indeksowane w bazie *Web of Science*.
Liczba punktów MNiSW: 14.
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu przeglądu literatury, sformułowaniu problemu i celu badawczego, opracowaniu ogólnej koncepcji uzależnienia dyskretnych zdarzeń w cyklu sterowania od położenia kąтового wirnika, opracowaniu scenariusza weryfikacji symulacyjnej, sformułowaniu wniosków, zredagowaniu większości tekstu. Mój udział szacuję na 50%.
- [IB8] Jarzębowicz L. ^(100%), *Modeling the impact of discretizing rotor angular position on computation of field-oriented current components in high speed electric drives*. Applied Mathematical Modelling 42/**2017**, pp. 576–590.
Publikacja w czasopiśmie z listy *Web of Science – Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)*.
Wskaźnik IF₂₀₁₇: 2,617. Liczba punktów MNiSW: 35.
- [IB9] Jarzębowicz L. ^(65%), Karwowski K. ^(15%), Kulesza W.J. ^(20%), *Sensorless algorithm for sustaining controllability of IPMSM drive in electric vehicle after resolver fault*. Control Engineering Practice 58/**2017**, pp. 117–126.
Publikacja w czasopiśmie z listy *Web of Science – Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)*.
Wskaźnik IF₂₀₁₇: 2,616. Liczba punktów MNiSW: 35.
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu przeglądu literatury, sformułowaniu problemu i celu badawczego, opracowaniu proponowanych estymatorów położenia kąтового wirnika oraz metodyki ich uruchamiania w stanach awaryjnych, zaprojektowaniu scenariusza i wykonaniu badań eksperymentalnych. Mój udział szacuję na 65%.
- [IB10] Jarzębowicz L. ^(70%), Opaliński A. ^(20%), Cisek M. ^(10%), *Improving Control Dynamics of PMSM Drive by Estimating Zero-Delay Current Value*. Elektronika ir Elektrotehnika, Vol. 21, No 2, **2015**, pp. 20–23.
Publikacja w czasopiśmie z listy *Web of Science – Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)*.
Wskaźnik IF₂₀₁₅: 0,389. Liczba punktów MNiSW: 15.
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu przeglądu literatury, sformułowaniu celu badawczego, opracowaniu koncepcji proponowanego układu regulacji, opracowaniu metodyki doboru nastaw regulatorów, wykonaniu eksperymentu laboratoryjnego. Mój udział szacuję na 70%.
- [IB11] Jarzębowicz L. ^(100%), *Indirect measurement of motor current derivatives in PMSM sensorless drives*. Elektronika ir Elektrotehnika, Vol. 20, No 7, **2014**, pp. 23–26.
Publikacja w czasopiśmie z listy *Web of Science – Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)*.
Wskaźnik IF₂₀₁₄: 0,561. Liczba punktów MNiSW: 15.
- [IB12] Jarzębowicz L. ^(100%), *Error analysis of calculating average d-q current components using Regular Sampling and Park transformation in FOC drives*. Proc. 2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering. Iasi, Romania, 16–18 Oct **2014**.
Publikacja w materiałach konferencyjnych dostępnych w bazach *IEEE Xplore* oraz *Web of Science Conference Proceedings Citation Index-Science (CPCI-S)*.
Liczba punktów MNiSW: 15.

3) Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników:

3.1) Obszar badawczy

Nowoczesne napędy trakcyjne wykorzystują przeważnie silniki prądu przemiennego – silniki indukcyjne (ang. *induction motor*, IM) lub silniki synchroniczne o magnesach trwałych (ang. *permanent magnet synchronous motor*, PMSM). Silniki indukcyjne preferowane są w napędach większych mocy, np. w tramwajach, autobusach elektrycznych, zespołach trakcyjnych i lokomotywach. Napędy z silnikami PMSM dominują w pojazdach mniejszych mocy, np. w samochodach z napędem

elektrycznym i hybrydowym. Udział silników PMSM w napędach trakcyjnych o mocy powyżej 150 kW jest niewielki, jednak powoli wzrasta. Silniki trakcyjne są najczęściej silnikami trójfazowymi zasilanymi z dwupoziomowego, tranzystorowego falownika napięcia. Napięcia wyjściowe falownika generowane są za pomocą modulacji szerokości impulsów (ang. *pulse width modulation*, PWM).

Podstawowym trybem pracy napędu trakcyjnego jest tryb regulacji momentu i strumienia magnetycznego silnika. Zewnętrzna pętla regulacji prędkości (np. tempomat stosowany w samochodach) uaktywniana jest tylko w specyficznych warunkach jazdy. Popularne w napędach trakcyjnych jest stosowanie połowo-zorientowanej metody sterowania silnikiem, w której regulacja momentu i strumienia sprowadza się do regulacji składowych i_q i i_d wektora prądu silnika wyrażonego w wirującym układzie współrzędnych d-q. Charakterystyka trakcyjna napędu, określająca zależność dostępnego momentu od prędkości kątowej wirnika, zawiera co najmniej dwie strefy pracy – strefę stałego momentu i strefę stałej mocy. W drugiej strefie wypadkowy strumień silnika jest osłabiany poprzez odpowiednie sterowanie składową i_d prądu stojana. Umożliwia to regulację momentu po osiągnięciu maksymalnego napięcia wyjściowego falownika i dalsze zwiększanie prędkości. Strefa stałej mocy w napędach trakcyjnych obejmuje typowo od 50 do 80% zakresu prędkości pracy. W niektórych napędach z silnikami indukcyjnymi dla najwyższych prędkości wyróżnia się dodatkową, trzecią strefę pracy napędu, w której utrzymywany jest stały poślizg silnika.

W ostatnich latach zauważyć można pewne tendencje zmian w napędach trakcyjnych. Jedną z nich jest zwiększanie prędkości kątowych wirnika, którego głównym celem jest minimalizacja wymiarów oraz masy napędu. Dla przykładu – maksymalna prędkość kątowa silnika PMSM zastosowanego w pierwszej generacji samochodu hybrydowego Toyota Prius (1997 r.) wynosiła 6000 obr./min; w kolejnych generacjach sukcesywnie podnoszono tę prędkość aż do 13500 obr./min w obecnie produkowanej wersji. Podobny trend zauważyć można w napędach trakcyjnych z silnikami indukcyjnymi – np. samochód elektryczny Tesla S wykorzystuje napęd z silnikiem indukcyjnym o maksymalnej prędkości kątowej 16000 obr./min.

W związku z wysokimi wymaganiami dotyczącymi sprawności energetycznej napędów trakcyjnych częstotliwość modulacji napięcia wyjściowego falownika pojazdu (częstotliwość PWM) pozostaje na wyraźnie ograniczonym poziomie. Częstotliwość ta mieści się zazwyczaj w zakresie od kilkuset herców do około dwudziestu kiloherców – w zależności od mocy napędu. Stosunkowo niskie częstotliwości modulacji napięcia w połączeniu z coraz wyższymi prędkościami kątowymi napędów powodują, że napędy te pracują z niskim stosunkiem częstotliwości PWM do częstotliwości podstawowej przemiennego napięcia wyjściowego falownika.

W niektórych napędach pojazdów wykorzystywane jest tzw. sterowanie blokowe falownikiem (ang. *six-step*), w którym napięcie silnika nie jest modulowane, a liczba przełączeń tranzystorów falownika przypadająca na okres napięcia wyjściowego wynosi sześć. Sterowanie blokowe stosowane jest nie tylko dla ograniczenia strat łączeniowych tranzystorów, ale przede wszystkim dla zwiększenia amplitudy podstawowej harmonicznej napięcia silnika, która decyduje o dostępnym momencie elektromagnetycznym. Z uwagi na fakt, że praca przy ograniczeniu napięcia wyjściowego falownika obejmuje w napędach trakcyjnych z reguły co najmniej połowę zakresu prędkości pracy, uzyskiwane dzięki pracy blokowej zwiększenie momentu napędowego przekłada się na wyraźną poprawę dynamiki pojazdu. O ile wdrożenie falowników z nowymi typami tranzystorów, np. w technologii SiC, spowoduje zapewne zwiększenie częstotliwości modulacji napięcia wyjściowego falownika, to częstość przełączeń tranzystorów przy pracy blokowej jest niezależna od właściwości dynamicznych tranzystorów.

Od dłuższego czasu rozwijane jest sterowanie silnikami prądu przemiennego bez pomiaru wielkości elektrycznych – tzw. sterowanie bezczujnikowe. W silnikach indukcyjnych sterowanie takie zostało

dobrze opanowane. Badania naukowe w zakresie bezczujnikowego sterowania silnikami PMSM także wskazują na możliwość rezygnacji z przetwornika położenia i prędkości kątowej wirnika, lecz pomimo to napędy pojazdów produkowanych seryjnie prawie zawsze są wyposażone w przetwornik pomiarowy wielkości mechanicznych. Niemniej jednak w najbliższym czasie należy się spodziewać konieczności wdrażania bezczujnikowych metod sterowania silnikiem jako algorytmów rezerwowych, aktywowanych w razie awarii przetwornika wielkości mechanicznych. Obecnie dla samochodów z silnikami spalinowymi wymaga się rozbudowanych algorytmów samodiagnostycznych (ang. *on-board diagnostics, OBD*) oraz trybów sterowania awaryjnego umożliwiających kontynuację jazdy w przypadku usterki wybranych czujników. Analogiczne rozwiązania będą w najbliższych latach intensywnie rozwijane w samochodach z napędem elektrycznym oraz hybrydowym, a także na innego typu pojazdach wykorzystujące elektryczny napęd trakcyjny.

Zwiększa się liczba pojazdów z tzw. napędem bezpośrednim (ang. *in-wheel drive, hub drive*), w którym każde z kół napędnych sprzęgnięte jest z osobnym napędem elektrycznym. Tego typu rozwiązanie posiada liczne zalety, wśród których wymienić można możliwość wykorzystania napędów elektrycznych jako aktuatorów w systemach zwiększających bezpieczeństwo czynne takich jak np. ABS (ang. *anti-lock braking system*) czy ESP (ang. *electronic stability program*). Z uwagi na dużą dynamikę regulacji momentu w napędzie elektrycznym (w porównaniu z silnikiem spalinowym oraz z hydrauliczno-ciernym układem hamulcowym) jego wykorzystanie pozwala na efektywną regulację poślizgu kół, a przez to na wyraźne zwiększenie skuteczności systemów bezpieczeństwa. Opublikowane w ostatnich latach badania eksperymentalne potwierdziły m.in. możliwość skrócenia drogi awaryjnego hamowania samochodu nawet o 20% dzięki wykorzystaniu systemu ABS współpracującego z elektrycznymi napędami bezpośrednimi.

3.2) Motywacja do badań oraz cel naukowy

Opisane w poprzednim punkcie zmiany, obserwowane w ostatnim czasie w elektrycznych napędach trakcyjnych, związane są głównie z rozszerzeniem zakresu ich prędkości pracy oraz zaostrzeniem wymagań dotyczących jakości regulacji parametrów napędu. Dla przykładu – wprowadzenie napędu bezpośredniego powoduje, że dynamika zmian prędkości kątowych wirnika nie jest ograniczona dużą masą pojazdu, a – podczas utraty przyczepności koła – tylko niewielkim sumarycznym momentem bezwładności koła i wirnika silnika. Chęć wykorzystania napędu bezpośredniego do regulacji poślizgu koła stwarza zatem całkowicie inne wymagania dla właściwości dynamicznych układu regulacji momentu napędu. Ważne jest także uwzględnienie tych ograniczonych właściwości dynamicznych w projektowaniu oraz analizie działania algorytmów bezpieczeństwa czynnego pojazdów.

Istotne są także statyczne właściwości układu regulacji momentu i strumienia silnika, które uzależnione są nie tylko od zastosowanych układów i elementów, ale także od metodyki sterowania napędem. Stosowane są m.in. strategie sterowania dążące do maksymalizacji sprawności napędu poprzez odpowiednie wzajemne uzależnienie wartości składowych i_d i i_q wektora prądu. Opracowywane są algorytmy realizujące osłabianie strumienia silnika przy jak najmniejszym marginesie pomiędzy siłą elektromotoryczną silnika i maksymalnym napięciem wyjściowym falownika, co przekłada się na maksymalizację dostępnego momentu elektromagnetycznego silnika. Skuteczność wyżej opisanych algorytmów uzależniona jest od precyzji regulacji prądów silnika. W świetle rosnących wymagań dotyczących efektywności energetycznej oraz maksymalizacji momentu i mocy jednostkowej napędu (odniesionej do masy i objętości) precyzja regulacji prądów silnika jest istotnym czynnikiem. Jednocześnie na precyzję tę duży wpływ na pracę z wysokimi prędkościami kątowymi, co wykazano w pracach habilitanta omówionych w kolejnym punkcie autoreferatu.

Napędy trakcyjne łączą wiele wymagań, których jednoczesne spełnienie jest trudne. Na przykład – sterowanie blokowe falownikiem, stosowane w celu maksymalizacji dostępnego momentu, połączone jest z potrzebą dynamicznej regulacji momentu silnika, która wymagana jest w napędach bezpośrednich. Wymaga to zastosowania niekonwencjonalnych rozwiązań w zakresie algorytmów regulacyjnych.

Spodziewany rozwój algorytmów samodiagnostycznych oraz algorytmów sterowania awaryjnego motywuje do poszukiwania nowych sposobów pozyskiwania informacji o parametrach pracy napędu elektrycznego. Wskazane jest, aby były to sposoby, które nie wymagają instalowania dodatkowych czujników pomiarowych, lecz wykorzystują standardowe układy pomiarowe oraz odpowiednie modelowanie matematyczne napędu.

W związku z istotnymi zmianami warunków pracy i wymagań stawianych napędom trakcyjnym, modele matematyczne wykorzystywane w sterowaniu i w syntezie działania tych napędów a także same metody sterowania wymagają analizy ukierunkowanej na te zmiany. Konsekwencją identyfikacji ograniczeń wyżej wymienionych modeli i metod powinna być propozycja nowych rozwiązań.

Głównym celem naukowym w pracach stanowiących osiągnięcie naukowe habilitanta jest: analiza ograniczeń obecnie stosowanych sposobów modelowania oraz sterowania trakcyjnymi silnikami prądu przemiennego w kontekście nieustannego rozszerzania ich warunków pracy i wymagań dotyczących jakości regulacji oraz propozycja nowych sposobów modelowania i sterowania.

Wyniki prac autora zawartych w publikacjach [IB1–IB12] omówiono w kolejnym punkcie autoreferatu. Osiągnięcia naukowe habilitanta podsumowano w ramach następujących podobszarów badawczych, do których przypisano odpowiednie poszczególne publikacje:

- podobszar związany z dokładnością wyznaczania przez sterownik cyfrowy napędu uśrednionych prądów silnika wyrażonych w wirującym układzie współrzędnych d-q [IB8][IB12];
- podobszar związany z kształtowaniem napięcia wyjściowego falownika pracującego w trybie blokowym [IB7];
- podobszar związany z pośrednim pomiarem pochodnych prądów silnika PMSM oraz jego praktycznym wykorzystaniem do sterowania napędem [IB9][IB10][IB11];
- podobszar związany z modelowaniem przebiegów prądów silnika PMSM pracującego przy niskiej wartości stosunku częstotliwości PWM do częstotliwości podstawowej napięcia silnika [IB1][IB2][IB3][IB5][IB6];
- podobszar związany z modelowaniem dynamiki napędu PMSM do celów analizy działania systemów bezpieczeństwa czynnego pojazdu [IB4].

Cykl publikacji stanowiący osiągnięcie naukowe dotyczy w zdecydowanej większości napędów z silnikami PMSM. Napęd z silnikiem indukcyjnym był przedmiotem referatu [IB12]. Niemniej jednak rozważana przez habilitanta problematyka oraz zaproponowane sposoby jej syntezy są w dużej mierze uniwersalne i mogą znaleźć zastosowanie zarówno w napędach z silnikami PMSM jak i indukcyjnymi. Cykl prac [IB1–IB12] ponumerowano w odwrotnym porządku chronologicznym, biorąc pod uwagę daty publikacji. Z uwagi na zróżnicowany czas recenzji i oczekiwania na publikację kolejność ta nie w każdym przypadku odpowiada kolejności opracowania manuskryptów.

3.3) Omówienie prac badawczych i ich wyników

Regulacja prądów silnika za pomocą sterownika cyfrowego związana jest z cyklicznie powtarzaną sekwencją zdarzeń obejmującą: pomiar sygnałów sprzężeń zwrotnych, wykonanie obliczeń algorytmu, uaktualnienie wartości zadanych modulatora napięcia. Częstość powtarzania tej sekwencji jest zdeterminowana częstością, z jaką możliwe jest uaktualnianie wartości zadanych modulatora napięcia. Z reguły nie stosuje się wielokrotnego uaktualniania tych wartości w czasie trwania cyklu PWM, więc częstość powtarzania wyżej wymienionej sekwencji zdarzeń jest równa częstotliwości PWM. Z kolei częstotliwość PWM podyktowana jest przede wszystkim właściwościami dynamicznymi tranzystorów falownika i związanymi z nimi stratami komutacyjnymi. W konsekwencji częstość powtarzania sekwencji zdarzeń w sterowniku cyfrowym napędu trakcyjnego jest ograniczona do kilkunastu kiloherców – w napędach niewielkich mocy, a nawet do kilkuset herców – w napędach dużych mocy.

Modulacja napięcia wyjściowego falownika powoduje, że w przebiegach napięć i prądów silnika występują składowe szybkozmiennne, wykraczające poza pasmo częstotliwości, które obejmuje pętla regulacji prądu. Dlatego regulacja ta powinna opierać się na wartościach prądów i napięć, które reprezentują właściwości tych wielkości w cyklu regulacyjnym, tj. w cyklu PWM. Przyjęto, że takim typem wielkości jest średnia liczona za czas trwania cyklu PWM. Modulator napięcia generuje zatem taką sekwencję przełączeń tranzystorów falownika, aby wartości średnie napięć silnika w cyklu modulacji odpowiadały wartościom zadany do modulatora przez algorytm regulacji prądów. Pomiar prądów silnika, którego wyniki służą do wyznaczenia sygnałów sprzężeń zwrotnych dla regulatorów, także z założenia ma reprezentować wartość średnią prądów za okres modulacji. W konsekwencji regulacja momentu i strumienia także dotyczy uśrednionych wartości tych wielkości za cykl PWM.

Stosowana w sterownikach mikroprocesorowych technika wyznaczania średnich (za cykl PWM) prądów silnika i_d , i_q wyrażonych w wirującym układzie współrzędnych d-q polega na określeniu w pierwszej kolejności uśrednionych prądów fazowych i_A , i_B , i_C . Dopiero w kolejnym kroku wartości te są przeliczane na składowe wektora w wirującym układzie współrzędnych d-q. Wykorzystuje się do tego transformację Clarke oraz transformację Park'a. Obliczenia transformacji układu współrzędnych opierają się na dyskretnych wartościach wejściowych obejmujących uśrednione prądy fazowe oraz kąt położenia układu d-q względem układu naturalnego ABC. Taka technika przetwarzania sygnału prądowego sprzężenia zwrotnego daje poprawny wynik (w sensie średnich wartości składowych i_d i i_q prądu) przy założeniu, iż zmiany kąta położenia układu d-q w cyklu regulacji są pomijalnie małe.

Kierując się wyżej wymienioną tezą, w pracy [IB12] zdefiniowano problematykę przetwarzania sygnałów sprzężenia prądowego w napędzie pracującym przy niskim stosunku częstotliwości PWM do częstotliwości podstawowej napięcia wyjściowego falownika. Posłużono się przykładem układu napędowego z silnikiem indukcyjnym, w którym realizowana jest regulacja prądów stojana w układzie współrzędnych związanym ze strumieniem wirnika (ang. *rotor flux-oriented control*, *RFOC*). Omówiono wpływ błędów regulacji średnich prądów w układzie d-q na moment oraz strumień silnika.

W omawianej pracy wyznaczono błędy związane z transformacją prądów fazowych do wirującego układu współrzędnych d-q opartą na dyskretnych wartościach wejściowych. Dla umożliwienia analitycznego opisu problemu przyjęto szereg założeń. Analizę wykonano dla składowej podstawowej prądu (ang. *fundamental current*), pomijając zjawiska związane z modulacją napięcia. Przyjęto, że wartość uśredniona prądu fazowego reprezentowana jest przez wartość chwilową prądu w połowie cyklu PWM, co wymaga założenia liniowych zmian prądów silnika przy stałym napięciu zasilającym. Przyjęto także, że analizowany jest stan pracy ustalonej oraz że wektor prądu stojana, wyrażony w stacjonarnym układzie współrzędnych, wiruje ze stałą prędkością równą prędkości synchronicznej. Powyższe założenia pozwoliły na analityczne oszacowanie błędu związanego z transformacją średnich

prądów fazowych do wirującego układu współrzędnych d-q. Błąd ten zdefiniowano jako względną różnicę pomiędzy modułem wektora prądu obliczonym przez sterownik mikroprocesorowy a modułem wektora reprezentującego uśredniony (za cykl PWM) prąd, wyrażonego w wirującym układzie d-q. Błąd ten wyrażono jako funkcję iloczynu pulsacji synchronicznej i czasu trwania cyklu PWM.

Szacunki analityczne zweryfikowano poprzez badania symulacyjne wykonane dla napędu elektrycznego zespołu trakcyjnego, pracującego z częstotliwością modulacji napięcia wynoszącą 1 kHz. Przy maksymalnej prędkości napędu pulsacja napięcia wyjściowego falownika wynosiła 1000 rad/s, co odpowiada iloczynowi pulsacji synchronicznej i czasu trwania cyklu PWM na poziomie 1 rad. Badania symulacyjne potwierdziły szacunki analityczne wskazując, iż przy maksymalnej prędkości napędu (odpowiadającej prędkości liniowej pojazdu wynoszącej 160 km/h) błąd wyznaczania modułu wektora reprezentującego uśredniony za cykl PWM prąd w układzie współrzędnych d-q wynosi około 4,5%.

Rozważania zainicjowane w referacie [IB12] zostały rozszerzone w artykule [IB8], w którym rozwinięto opis matematyczny błędów przetwarzania sygnałów prądowego sprzężenia zwrotnego. Uwzględniono przy tym niejednostajne zmiany kąta wektora prądu w odniesieniu do stacjonarnego układu współrzędnych. Wprowadzono także zmienne umożliwiające uwzględnienie stanów przejściowych związanych z procesem regulacji prądów silnika.

Dla umożliwienia sformułowania uogólnionego opisu matematycznego błędów zaproponowano oryginalną metodykę normalizacji modułu i kąta położenia wektora prądu. Metodyka ta pozwoliła na obliczenie błędów w sposób analityczny, z uwzględnieniem parametrów odwzorowujących stan pracy napędu. Obliczenia błędów wykonano dla napędu z silnikiem PMSM. Założono, że falownik pracuje w trybie blokowym, co odpowiada warunkom pracy, dla których rozważane błędy przetwarzania sygnałów prądowego sprzężenia zwrotnego przyjmują największe wartości. Zdefiniowano błędy względne wyznaczania modułu i kąta wektora reprezentującego średnią wartość prądu (za cykl PWM) w wirującym układzie współrzędnych d-q. Podejście takie nie ukazuje bezpośrednio wpływu analizowanego błędu na regulację strumienia i momentu silnika, jednak pozwala na uogólnioną analizę błędów, bez ukierunkowania na parametry konkretnego napędu. Wykazano, że w stanie ustalonym, w którym wektor prądu nie zmienia się w kolejnych cyklach regulacji, błąd kąta wektora nie występuje, zaś błąd modułu jest równy 5,3%. Błąd wyznaczania kąta wektora prądu pojawia się w stanach przejściowych.

Przeprowadzone studium analityczne opiera się na założeniu liniowych zmian prądów fazowych w okresach stałego napięcia zasilającego silnik. Badania symulacyjne, ukierunkowane na weryfikację wyżej wymienionego założenia, wykonane zostały dla modelu silnika sprowadzonego do obwodu zastępczego RL. Poprzez wariantowanie rezystancji i indukcyjności odwzorowywano właściwości silników o różnej mocy znamionowej. Przyjęto trzy warianty tej mocy: 120, 22 i 0,4 kW. Dla dwóch pierwszych wariantów uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników symulacyjnych z analitycznymi. Weryfikacja dla silnika małej mocy wykazała zauważalne rozbieżności wynikające z założenia liniowej zmiany prądu. Pomimo tych niedokładności, wyznaczenie wektora reprezentującego uśrednione prądy wyrażone w wirującym układzie d-q za pomocą zaproponowanej metody jest znacznie dokładniejsze niż w przypadku standardowej techniki stosowanej w sterownikach cyfrowych napędów.

W omówionym powyżej **podobszarze badawczym związanym z dokładnością wyznaczania przez sterownik cyfrowy napędu uśrednionych prądów silnika wyrażonych w wirującym układzie współrzędnych d-q**, obejmującym prace [IB8] oraz [IB12], za swoje główne osiągnięcia habilitant uważa:

- 1) identyfikację problemu związanego z mikroprocesorową techniką wyznaczania uśrednionych za cykl sterowania prądów i_d i i_q silnika w napędach pracujących przy niskim stosunku częstotliwości PWM do częstotliwości podstawowej napięcia silnika;

- 2) zaproponowanie metodyki opisu matematycznego powyższego problemu prowadzącej do uniwersalnego modelu umożliwiającego wyznaczanie błędów transformacji wartości uśrednionych ze stacjonarnego do wirującego układu współrzędnych.

Artykuł [IB7] także dotyczy napędu z silnikiem PMSM wykorzystującego blokowe sterowanie falownikiem. Zwrócono uwagę na wpływ sterowania mikroprocesorowego na kształtowanie przebiegów napięć wyjściowych falownika. Okresowe uaktualnianie wartości zadanych modulatora napięcia, powiązane z sekwencją pomiaru sygnałów sprzężeń zwrotnych oraz procedurą realizacji obliczeń algorytmu, powoduje, że napięcie wyjściowe falownika może zmienić się tylko w określonych chwilach czasu. W napędach szybkoobrotowych lub w napędach dużych mocy liczba uaktualnień przypadająca na okres napięcia wyjściowego falownika jest niewielka, rzędu kilkudziesięciu lub nawet kilkunastu. Powoduje to, że czasy trwania poszczególnych segmentów sześcioschodkowego przebiegu napięcia stają się zróżnicowane.

Problematyka kształtowania napięcia wyjściowego falownika pracującego przy niskim stosunku częstotliwości PWM do częstotliwości podstawowej napięcia była analizowana w literaturze przedmiotu w kontekście dla napędów z silnikiem indukcyjnym wykorzystujących modulację napięcia wyjściowego falownika. Jako główną przyczynę problemów literatura podaje niecałkowitą liczbą cykli sterowania przypadającą na okres napięcia wyjściowego falownika, a proponowanym środkiem zaradczym jest stosowanie zmiennej częstotliwości modulacji, której wartość dostosowywana jest do bieżącej częstotliwości napięcia wyjściowego falownika. W pracy [IB7] zidentyfikowano potrzebę stosowania zmiennego okresu cyklu sterowania w napędzie z silnikiem PMSM wykorzystującym blokowe sterowanie silnikiem. Udowodniono, że stały okres powoduje odkształcenia napięcia wyjściowego falownika związane ze zróżnicowanym czasem trwania sześciu segmentów napięcia. W konsekwencji w przebiegi napięć i prądów silnika zawierają składowe o częstotliwości podharmonicznej, co prowadzi do wyraźnego zwiększenia poziomu tętnień momentu silnika.

Zaproponowano oryginalną metodologię synchronizacji chwil aktualizacji stanu tranzystorów falownika z osiągnięciem wyznaczonych uprzednio położeń kątowych wirnika. Rozwiązanie takie jest dedykowane dla napędów, w których jako przetwornik położenia zastosowano enkoder przyrostowy sprzęgnięty z układem licznika sprzętowego zawartego w sterowniku cyfrowym napędu. Umożliwia to powiązanie układów logicznych wyznaczających stany sygnałów sterujących tranzystorami z wartością licznika enkoderowego. Dzięki odpowiedniemu ustawieniu rejestrów konfiguracyjnych sterownika, czasy przełączeń tranzystorów są wyznaczone sprzętowo, bez interakcji z programem sterowania.

Skuteczność zaproponowanej metodologii zweryfikowano na drodze symulacyjnej dla napędu PMSM o mocy 6,5 kW. Liczbę aktualizacji stanów falownika, przypadającą na obrót wirnika silnika, uzależniono od zakresu prędkości wirnika, tak aby częstotliwość aktualizacji mieściła się w zakresie od 7 do 15 kHz. Zdefiniowano kryteria umożliwiające porównanie zaproponowanej metodyki z metodyką standardową. Dla rozważanego napędu udowodniono, że przy zastosowaniu proponowanej metody wartość skuteczna (RMS) uchybu regulacji momentu zmniejszyła się ponad trzykrotnie, zaś współczynnik zniekształceń THD prądu fazowego zmniejszył się około dwukrotnie.

Podsumowując, **w podobszarze badawczym związanym z kształtowaniem napięcia wyjściowego falownika pracującego w trybie blokowym** (praca [IB7]) za swoje główne osiągnięcia habilitant uważa:

- 1) identyfikację problemu zniekształceń przebiegu napięcia wyjściowego, związanego z utrzymywaniem stałego okresu aktualizacji stanów tranzystorów w trybie pracy blokowej falownika;

- 2) zaproponowanie metodyki sterowania falownikiem opartej na synchronizacji chwil przełączeń tranzystorów z osiągnięciem przez wirnik ustalonych położenia kątowych.

W kolejnych pracach [IB9][IB10][IB11] przedstawiono problematykę związaną z pośrednim pomiarem pochodnych prądów fazowych silnika oraz wykorzystaniem ich wartości w algorytmach sterowania napędem. Wartości pochodnych zawierają informacje użyteczne dla celów diagnostyki napędu, predykcji prądów, estymacji wielkości trudno mierzalnych, identyfikacji parametrów silnika itp. W rozwiązaniach literaturowych pomiar pochodnych prądu wykorzystuje z reguły dedykowane przetworniki pomiarowe, np. cewki Rogowskiego. Omawiane prace habilitanta opierają się na pośrednim pomiarze pochodnych, wykorzystującym wielokrotny pomiar prądów w odpowiednich chwilach cyklu PWM.

Mikroprocesory pełniące funkcję sterowników napędu umożliwiają zazwyczaj wielokrotny pomiar prądów silnika w czasie cyklu modulacji napięcia wyjściowego falownika oraz precyzyjne określenie chwil czasowych tego pomiaru. Aktualizacja napięć zadanych modulatora napięcia odbywa się na początku każdego cyklu PWM, stąd sekwencja i czasy przełączeń tranzystorów są znane jeszcze przed rozpoczęciem cyklu. Daje to możliwość zaprogramowania bloku przetwornika analogowo-cyfrowego w taki sposób, aby wykonał pomiary prądów silnika w określonej korelacji czasowej z przełączeniami tranzystorów. Odpowiednie rozmieszczenie chwil pomiarów prądu w cyklu PWM daje możliwość wyznaczenia pochodnych tego prądu odpowiadających różnym stanom aktywnym lub pasywnym falownika.

Praca [IB11] skupia się na problematyce dokładności pośredniego pomiaru pochodnych prądów fazowych silnika w stanach pasywnych falownika (przy zerowym napięciu silnika). Metodyka pomiaru pośredniego opiera się na aproksymacji pochodnej prądu ilorazem różnicowym, do wyznaczenia którego wystarczą dwa pomiary wartości chwilowej prądu wykonane w znanym odstępie czasu. Z uwagi na niedokładności pomiaru prądu, wskazane jest, aby odstęp czasu był jak największy.

W omawianym artykule zwrócono uwagę na problem związany z występowaniem w przebiegach prądów zaburzeń komutacyjnych. Próbkowanie prądu w czasie występowania tych zaburzeń jest niemiernodajne. W literaturze proponuje się odsunięcie pomiaru w czasie aż do wygaśnięcia zaburzeń, co trwa przeciętnie od 5 do 8 μ s. Stwarza to jednak duże ograniczenia dla minimalnego czasu trwania rozważanego stanu stabilnego falownika. W kontekście pomiaru pochodnej odpowiadającej pasywnemu stanowi falownika przenosi się to na minimalny czas generacji tzw. wektorów zerowych, a więc ogranicza maksymalne napięcie wyjściowe falownika. Ponadto, w artykule [IB11] przedstawiono oryginalne wyniki eksperymentalnie, które wskazują, że czas wygaśnięcia zaburzeń komutacyjnych jest różny dla trybu pracy silnikowej i prądnicowej napędu, co stwarza dodatkowe trudności w doborze chwili próbkowania w napędach wykorzystujących hamowanie dynamiczne, np. napędach trakcyjnych.

W omawianej pracy [IB11] zaproponowano technikę pośredniego pomiaru pochodnej prądu, w której wykonywanie pierwszego z pary pomiarów prądu odbywa się synchronicznie ze zmianą sygnału wyłączającego tranzystor falownika, tj. przed wystąpieniem zaburzeń komutacyjnych. Pary pomiarów prądów wykonywane są zarówno dla stanów pasywnych falownika występujących w środku cyklu PWM (załączone wszystkie górne tranzystory) oraz na skrajach cyklu (załączone wszystkie dolne tranzystory). Czterokrotny pomiar pozwala na obliczenie skumulowanej zmiany prądu obejmującej oba stany pasywne. W ogólności występowanie pomiędzy pomiarami prądu końcowej fazy poprzedzającego stanu falownika oraz zaburzeń komutacyjnych ma negatywny wpływ na dokładność wyznaczonej pochodnej, odpowiadającej zerowemu napięciu silnika. Obliczanie skumulowanego przyrostu prądu powoduje jednak, że błędy wyznaczania przyrostu prądów w dużej mierze znoszą się,

umożliwiając dokładniejsze wyznaczenie pochodnych prądu bez konieczności wprowadzenia znaczącego ograniczenia jeśli chodzi o minimalny czas trwania stanów pasywnych falownika. Skuteczność zaproponowanej techniki pośredniego pomiaru pochodnej potwierdzono wykorzystując badania eksperymentalne wykorzystujące napęd z silnikiem PMSM.

Tematyka artykułu **[IB10]** także związana jest z pomiarem pochodnych prądów silnika. Pochodne te nie są jednak wyznaczone dla poszczególnych stanów stabilnych falownika, a dla tzw. podstawowej składowej prądu (ang. *fundamental current*), będącej teoretyczną odpowiedzią silnika na stałe napięcie zasilające o wartości równej uśrednionemu napięciu zmodulowanemu. Standardowo w napędach prądu przemiennego próbkowanie prądu odbywa się jednokrotnie w cyklu PWM – na początku lub w środku symetrycznego cyklu modulacji. Czas, jaki mija od chwili pomiaru prądów do uaktualnienia napięć zadanych modulatora PWM dla kolejnego cyklu sterowania, jest równy odpowiednio całości lub połowie czasu trwania cyklu PWM. W artykule **[IB10]** wykazano, że wybór chwili próbkowania znacząco wpływa na właściwości dynamiczne układu regulacji prądów. Zaproponowano metodę predykcyjnego wyznaczania wartości prądu odpowiadającej chwili aktualizacji napięć zadanych modulatora napięcia. Wykorzystanie tej wartości przy obliczaniu błędów dla regulatorów prądu daje możliwość przyjęcia wyraźnie większych wzmocnień regulatorów i znaczącą poprawę właściwości dynamicznych układu regulacji prądu.

Zaproponowana w artykule **[IB10]** metoda predykcji prądu opiera się na dwukrotnym pomiarze prądów w cyklu PWM – na początku oraz w środku cyklu. Pomiarzy te pozwalają na określenie ilorazu różnicowego (pochodnej prądu), a następnie na ekstrapolację funkcji liniowej łączącej wykonane pomiary. W ten sposób wyznaczana jest wartość prądu na końcu rozważanego cyklu PWM, a więc wartość odpowiadająca chwili aktualizacji wartości zadanych modulatora napięcia. W omawianej pracy zaproponowano ponadto metodykę doboru nastaw regulatorów napędu ze sterowaniem polowozorientowanym, dzięki której odpowiedź na skokową zmianę prądu zadanego może być zrealizowana w jednym cyklu sterowania, co jest najkrótszym technicznie możliwym do uzyskania czasem przy założeniu braku możliwości aktualizacji wartości zadanych w trakcie cyklu PWM. Możliwość uzyskania odpowiedzi jednokrokowej uwarunkowana jest czynnikami technicznymi takimi jak indukcyjność silnika, dostępne napięcie wyjściowe falownika i bieżąca wartość siły elektromotorycznej. Niemniej jednak, nawet w przypadku konieczności osiągnięcia wartości zadanej w wielu krokach, liczba tych kroków jest minimalną technicznie możliwą do uzyskania wartością. Skuteczność zaproponowanej metody predykcji prądu i metodyki doboru nastaw regulatorów potwierdzono symulacyjnie oraz eksperymentalnie dla napędu PMSM.

W pracy **[IB9]** pośredni pomiar pochodnych prądu wykorzystano w algorytmie awaryjnego, bezczujnikowego sterowania trakcyjnym silnikiem PMSM o magnesach zagłębionych w wirniku, aktywowanego w razie awarii przetwornika położenia i prędkości kątowej wirnika. W pracy wskazano na potrzebę wdrażania algorytmów sterowania, uruchamianych w razie awarii wybranych komponentów układu napędowego. Sformułowano wymagania dla algorytmu uruchamianego w razie awarii przetwornika położenia i prędkości kątowej wirnika, wskazując na wyższość algorytmów umożliwiających rozpoczęcie pracy przy nieznanym położeniu i prędkości kątowej (ang. *flying start*) nad metodami wymagającymi ciągłej pracy w tle algorytmu standardowego (korzystającego z przetwornika pomiarowego położenia i prędkości kątowej wirnika). Zwrócono uwagę na wyraźnie inne wymagania dla metod sterowania bezczujnikowego aktywowanych w przypadku awarii względem metod bezczujnikowych stosowanych w ramach normalnej pracy napędu.

Dla rozważanego zastosowania zaproponowano zestaw dwóch algorytmów estymacji położenia kątowego wirnika opartych na pomiarze i analizie pochodnych prądów fazowych silnika. Aparat

matematyczny wykorzystanych algorytmów opracowano wcześniej, w ramach rozprawy doktorskiej habilitanta, która dotyczyła sterowania napędem PMSM bez wykorzystywania przetworników pomiarowych wielkości mechanicznych. W pracy [IB9] zaprezentowano metodykę awaryjnej aktywacji tych algorytmów w trakcie pracy napędu, po wykryciu uszkodzenia przetwornika położenia i prędkości wirnika. Zaproponowano oraz zrealizowano scenariusz testów eksperymentalnych aktywacji algorytmów bezczujnikowych udowadniający ich użyteczność jako algorytmów awaryjnych.

W podobszarze badawczym związanym z pośrednim pomiarem pochodnych prądów silnika oraz jego praktycznym wykorzystaniem do sterowania napędem, obejmującym prace [IB9][IB10][IB11], za swoje główne osiągnięcia habilitant uważa:

- 1) opracowanie metodyki pomiaru pochodnych prądu silnika dla pasywnego stanu falownika poprzez czterokrotny pomiar prądu w okresie modulacji oraz wyliczenie skumulowanego przyrostu prądu;
- 2) opracowanie koncepcji algorytmu predykcji wartości prądu odpowiadającej chwili uaktualnienia wartości zadanych modulatora PWM; opracowanie metodyki doboru nastaw regulatorów w napędzie PMSM ze sterowaniem polowo-zorientowanym pozwalającej na uzyskanie odpowiedzi na skok jednostkowy w jednym cyklu sterowania;
- 3) opracowanie metodyki aktywacji metod pośredniego pomiaru pochodnych prądów silnika oraz wykorzystujących ten pomiar awaryjnych algorytmów sterowania bezczujnikowego podczas pracy napędu (ang. *flying start*).

W literaturze tematu oraz w pracach autora opisanych powyżej wykorzystuje się założenie, że przy analizie przebiegów prądów silnika w krótkich okresach czasu, tj. w czasie cyklu PWM lub jego części, przebiegi te można aproksymować liniową funkcją czasu. Założenie to zakwestionowano w pracach zespołu *C.M. Wolf, W. Degner, F. Briz* w kontekście silników o krótkich elektrycznych stałych czasowych. Zagadnienie to zostało także przeanalizowane przez habilitanta w opisanej wcześniej pracy [IB8]. Nowsze prace autora wskazują jednak na inny powód nieliniowości przebiegów prądów, jakim są zmiany wartości siły elektromotorycznej silnika w rozważanym czasie. Problematyce modelowania przebiegów prądu w powyższym kontekście poświęcono prace [IB1][IB2][IB3][IB5][IB6].

W pracy [IB3] zidentyfikowano problem niewystarczającej dokładności liniowej aproksymacji przebiegów prądów w napędach szybkoobrotowych, w których stosunek częstotliwości modulacji do częstotliwości napięcia wyjściowego falownika jest stosunkowo niewielki. Bazując na ogólnym modelu matematycznym silnika PMSM, sformułowanym dla czasu ciągłego, wykazano, że znaczna droga kątowna pokonywana przez wirnik w czasie cyklu PWM powoduje wyraźną zmianę kąta wektora reprezentującego siłę elektromotoryczną indukowaną w uzwojeniach stojana. Błędy liniowej aproksymacji przebiegów prądu przeanalizowano dla przykładowego napędu z szybkoobrotowym silnikiem PMSM. Zdefiniowano dwa rodzaje błędów: błąd wyznaczania chwilowej wartości prądu w środkowym punkcie cyklu PWM i błąd wyznaczania wartości średniej prądu za cykl PWM. Analizę wpływu prędkości pracy napędu na powyższe błędy wykonano na drodze symulacyjnej oraz eksperymentalnej. W rozważanym napędzie przy maksymalnej prędkości roboczej stosunek częstotliwości modulacji do częstotliwości napięcia wyjściowego falownika wyniósł 14, co odpowiada zmianom położenia kątownego wirnika w czasie cyklu PWM wynoszącym 25° . Dla tych warunków pracy błąd wyznaczania wartości chwilowej prądu w środku cyklu PWM osiągnął 12%, zaś błąd wyznaczania wartości średniej był na poziomie 4%. Wskazano tym samym na potrzebę innej niż liniowa aproksymacji prądów silnika w napędach pracujących przy niskim stosunku częstotliwości modulacji do częstotliwości podstawowej napięcia falownika.

W referacie [IB6] zaprezentowano metodykę modelowania napędu w programie Simulink. Proponowana metodyka pozwala na odwzorowanie nieliniowych zmian prądów fazowych silnika, które zidentyfikowano w [IB3] i polega na połączeniu podsystemów czasu ciągłego oraz dyskretnego. Model silnika odwzorowany jest w programie Simulink jako podsystem czasu ciągłego. Algorytm sterowania, realizowany w sterowniku mikroprocesorowym, modelowany jest za pomocą podsystemu dyskretnego, wywoływane w momencie próbkowania sygnałów sprzężeń zwrotnych. Generator PWM oraz falownik zamodelowano w dwóch wariantach, wskazując na możliwość dokładniejszego lub uproszczonego odwzorowania ich działania. Uproszczona wersja modelu korzysta z aproksymacji napięcia silnika poprzez wartość stałą, równą średniej za cykl modulacji. Odpowiada to modelowaniu tzw. podstawowych składowych napięcia i prądu silnika (ang. *fundamental voltage*, *fundamental current*), które jest wystarczające w przypadku większości analiz. Dokładniejsza wersja modelu odwzorowuje metodę modulacji napięcia wyjściowego falownika. Wyznaczanie chwil przełączeń tranzystorów odbywa się analogicznie do realizacji mikroprocesorowej, poprzez określenie występowania zdarzeń zrównania sygnału nośnej z wyliczonymi uprzednio stałymi wprowadzonymi do komparatorów. Zaproponowana metodyka umożliwi w wygodny i przejrzysty sposób odwzorować działanie sterownika cyfrowego, nie wykorzystując przy tym żadnych dodatkowych bibliotek programu Matlab/Simulink. Przedstawioną w omawianym referacie metodykę modelowania wykorzystano w pozostałych pracach habilitanta na potrzeby wyznaczania błędów liniowej aproksymacji prądów oraz do weryfikacji proponowanego przez autora sposobu dyskretyzacji modelu silnika.

Analiza błędów liniowej aproksymacji przebiegów prądu, zainicjowana w [IB3], została rozszerzona w pracy [IB2] o zagadnienie wpływu tych błędów na dokładność predykcji prądów w napędzie z silnikiem PMSM. Rozważono dwie metody predykcji: metodę ekstrapolacyjną zaproponowaną w [IB10] oraz metodę bazującą na modelu silnika (ang. *Model Predictive Control*, *MPC*). W drugim przypadku do dyskretyzacji modelu silnika wykorzystano aproksymację Euler'a. Wykorzystując metodykę modelowania opisaną w [IB6] wyznaczono symulacyjnie błędy predykcji prądu dla horyzontu predykcji wynoszącego jeden okres sterowania. Błędy wyliczono dla prądów i_d oraz i_q silnika, co pozwoliło na określenie wpływu tych błędów na jakość regulacji momentu i strumienia silnika PMSM. Przeprowadzona analiza wskazała na znaczące niedokładności, szczególnie dla metody opartej na modelu, dla której błąd predykcji składowej i_d był na poziomie 40% prądu znamionowego silnika. Ponadto zwrócono uwagę, że w praktycznej realizacji metody opartej na modelu silnika konieczna jest kompensacja opóźnienia pomiaru, która także bazuje na modelu, a zatem błąd kompensacji opóźnienia oraz błąd predykcji mogą się kumulować. W rezultacie błędy predykcji prądu metodą opartą na modelu silnika mogą być większe od przedstawionych w omawianym referacie [IB2].

W pracy [IB5] zaproponowano metodykę dyskretyzacji modelu matematycznego silnika PMSM, która pozwala na odwzorowanie nieliniowych zmian składowej podstawowej prądów fazowych silnika w okresie PWM, charakterystycznych dla pracy z niskim stosunkiem częstotliwości modulacji do częstotliwości napięcia wyjściowego falownika. Dyskretny model opracowano wychodząc od modelu sformułowanego dla czasu ciągłego, jednak wprowadzając założenia upraszczające m.in. polegające na przyjęciu stałej prędkości wirnika w cyklu PWM, co przełożyło się na aproksymację położenia kąтового za pomocą liniowej funkcji prędkości. Wielkościami wejściowymi modelu są dyskretnie wartości prądów fazowych silnika oraz prędkości i położenia wirnika, zmierzone na początku okresu PWM. Są to wielkości standardowo dostępne w sterowniku cyfrowym napędu, co czyni zaproponowany sposób modelowania łatwym w implementacji mikroprocesorowej. Dokładność zaproponowanego modelu zweryfikowano na drodze symulacyjnej poprzez porównanie przebiegów prądu fazowego wyznaczonego w proponowanym modelu oraz w modelu sformułowanym dla czasu ciągłego.

W kolejnym artykule [IB1] wykorzystano omówiony powyżej sposób modelowania silnika PMSM do opracowania algorytmu wyznaczania wartości średniej prądów fazowych silnika w cyklu PWM, dedykowanego dla napędów pracujących z niskim stosunkiem częstotliwości PWM do częstotliwości podstawowej napięcia silnika. Zaproponowana uprzednio w pracy [IB5] metodyka dyskretyzacji modelu pozwoliła na analityczne wyprowadzenie zależności opisującej wartość średnią prądu w zależności od zmiennych dostępnych pomiarowo w sterowniku, pozyskanych na początku cyklu PWM. Wyznaczenie wartości średniej odbywa się na zasadzie predykcji przebiegu prądu przy znanym napięciu zadanym modulatora napięcia. Weryfikacja symulacyjna zaproponowanej metody wskazała, że dla rozważanego napędu szybkoobrotowego dokładność wyznaczania średnich prądów fazowych silnika jest 10-krotnie większa, niż w przypadku standardowej metody próbkowania prądów w środku cyklu PWM.

W podobnym badawczym związku z modelowaniem przebiegów prądów silnika PMSM pracującego przy niskiej wartości stosunku częstotliwości PWM do częstotliwości podstawowej napięcia silnika, obejmującym prace [IB1][IB2][IB3][IB5][IB6], główne osiągnięcia habilitanta to:

- 1) identyfikacja i analiza niedokładności liniowej aproksymacji przebiegów prądów silnika w napędach pracujących przy niskiej wartości stosunku częstotliwości PWM do częstotliwości podstawowej;
- 2) propozycja metodyki dyskretyzacji modelu matematycznego silnika PMSM, pozwalającej na odwzorowanie nieliniowych zmian prądów fazowych w oparciu o dyskretne zmienne dostępne pomiarowo w sterowniku cyfrowym;
- 3) opracowanie metody wyznaczania prądów fazowych silnika PMSM, uśrednionych za cykl PWM, w napędzie pracującym przy niskiej wartości stosunku częstotliwości PWM do częstotliwości podstawowej napięcia.

Prezentowane w literaturze liczne analizy systemów bezpieczeństwa czynnego samochodów, w których elektryczne napędy bezpośrednie pojazdu są elementami wykonawczymi, odbywają się w większości poprzez symulacje komputerowe. Dla tego typu analiz istotne jest odwzorowanie dynamiki regulacji momentu napędu, jako czynnika determinującego skuteczność szybkiej regulacji poślizgu koła. W tego typu analizach model napędu jest elementem złożonej struktury opisującej dynamikę ruchu całego pojazdu oraz działanie algorytmów bezpieczeństwa, stąd metodyka modelowania napędu powinna być dostosowana do modelu nadrzędnego. Dlatego najwygodniejsze i najczęściej stosowane jest modelowanie napędu za pomocą transmitancji operatorowej w dziedzinie zmiennych zespolonych s lub z .

W pracy [IB4] przeanalizowano dokładność odwzorowania właściwości dynamicznych napędu PMSM pracującego w trybie regulacji momentu za pomocą modelu transmitancyjnego o różnym stopniu uszczegółowienia. Rozważono 3 transmitancje w domenie s oraz dwie w domenie z . Badania właściwości każdej z transmitancji wariantowano dodatkowo pod kątem chwili pomiaru prądu silnika, uwzględniając możliwość: pomiaru na początku cyklu PWM, pomiaru w środku cyklu PWM lub predykcji wartości odpowiadającej końcowi cyklu PWM [IB10]. Zdefiniowano kryteria oceny właściwości dynamicznych – zarówno w domenie czasu jak i częstotliwości. Wskazano, że żaden z rozważanych modeli nie odwzorowuje dobrze właściwości dynamicznych napędu w każdym z rozważanych kryteriów. Przedyskutowano użyteczność poszczególnych modeli w kontekście różnego rodzaju analiz.

W podobnym związku z modelowaniem dynamiki napędu PMSM do celów analizy działania systemów bezpieczeństwa czynnego pojazdu [IB4] za swoje główne osiągnięcie habilitant uważa:

- 1) opracowanie metodyki i wykonanie analizy dokładności modeli transmitancyjnych pod kątem odwzorowania dynamiki regulacji momentu napędu.

Podsumowując, cel naukowy sformułowany w punkcie 3.2 autoreferatu został osiągnięty. W przedstawionym cyklu prac habilitant przeanalizował ograniczenia obecnie stosowanych metod modelowania i sterowania silnikami prądu przemiennego w kontekście zastosowań trakcyjnych. Do analizy habilitant posłużył się oryginalnymi, autorskimi metodami. Habilitant zaproponował także nowe sposoby modelowania napędu, pomiaru prądów silnika i ich pochodnych, a także kształtowania napięcia wyjściowego falownika. Zaproponowane rozwiązania poprawiają jakość regulacji momentu i strumienia napędu oraz umożliwiają pozyskanie dodatkowych danych pomiarowych, które mogą mieć różnorakie zastosowania.

Prace autora zainspirowane zostały problemami wynikającymi z zastosowania napędów elektrycznych do napędu pojazdów. Niemniej jednak zidentyfikowane ograniczenia i zaproponowane przez habilitanta nowe metody mogą zostać użyte także w napędach o innym zastosowaniu, w których wybrane wymagania lub warunki pracy są podobne to tych występujących w napędach trakcyjnych.

IV. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Główny obszar tematyczny prac badawczych habilitanta obejmuje napędy trakcyjne, przede wszystkim napędy z silnikami PMSM. W obszarze tym mieści się cykl publikacji przedstawiony jako osiągnięcie naukowe. Planowana jest kontynuacja prac w ww. obszarze, m.in. w ramach projektu nr 2018/02/X/ST7/00488 przyznanego przez Narodowe Centrum Nauki w 2018 r., w którym habilitant pełni rolę kierownika.

Trakcyjnych układów napędowych dotyczy także aktualnie realizowany projekt nr POIR.01.02.00-00-0193/16-00 (Narodowe Centrum Badań i Rozwoju), w którym habilitant jest wykonawcą. Opracowywany jest wielosystemowy układ napędowy dla elektrycznego zespołu trakcyjnego, oparty na tranzystorach w technologii SiC. Rola habilitanta w tym projekcie koncentruje się na modelowaniu układu napędowego oraz prowadzeniu badań eksperymentalnych. Habilitant prowadził także badania zleczone przez Przedsiębiorstwo WR Sp. z o.o. dotyczące układów napędowych wózków dla osób o ograniczonej zdolności ruchowej.

Innym obszarem, w którym habilitant prowadził badania po uzyskaniu stopnia naukowego doktora, jest diagnostyka taboru kolejowego oraz infrastruktury kolejowej. Prace w tym zakresie odbywały się w ścisłej współpracy z zespołem Katedry Inżynierii Elektrycznej Transportu, w której habilitant pełni rolę Kierownika Laboratorium Trakcji Elektrycznej. W ramach projektu nr 7188/B/T02/2011/40 (Narodowe Centrum Nauki) opracowano nowatorską metodę diagnostyki stanu nakładek stykowych wykorzystującą obrazowanie trójwymiarowe. Na zlecenie spółki PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. opracowano system monitoringu odbieraków prądu, pozwalający na analizę stanu technicznego odbieraka przy przejeździe pociągu przez punkt diagnostyczny zlokalizowany na linii kolejowej. Stanowisko monitoringu odbieraków prądu wdrożono do eksploatacji na linii kolejowej pomiędzy Warszawą a Gdańskiem. Na zlecenie spółki PKP Energetyka S.A. opracowano projekt koncepcyjny wagonu diagnostycznego sieci trakcyjnej przystosowanego do pomiarów z prędkością 200 km/h. Obecnie trwają prace nad systemem wyznaczania dokładnej trajektorii pojazdu szynowego z wykorzystaniem technik geolokalizacji satelitarnej w ramach projektu nr POIR.04.01.01-00-0017/17 (Narodowe Centrum Badań i Rozwoju).

Zainteresowania badawcze habilitanta obejmują także zagadnienia systemów zasilania pojazdów oraz ich energochłonności. W tym obszarze wykonano opracowano szereg projektów na zlecenie spółek WYG Consulting Sp. z o.o. oraz WYG International Sp. z o.o., które dotyczyły modernizacji i elektryfikacji linii kolejowych. Badania zleczone wykonano także dla firmy Hyundai Rothem Company (Korea), dotyczyły one energochłonności tramwaju z superkondensatorowym zasobnikiem energii.

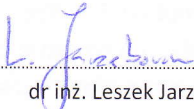
Habilitant, w ramach projektu badawczego nr POIR.01.02.00-00-0318/16 (Narodowe Centrum Badań i Rozwoju), uczestniczył także w opracowanie systemu telemetrycznego opartego na technologii *NarrowBand*

LTE, dedykowanego dla rozwiązań typu *Internet of Things*. Stacje bazowe telefonii komórkowej umożliwiające wykorzystanie tej technologii są w Polsce dopiero na etapie eksploatacji próbnej. Zadania habilitanta są związane przede wszystkim z opracowaniem nowych protokołów komunikacyjnych, kompresją danych oraz problematyką zasilania urządzeń telemetrycznych.

Poza uczestnictwem w projektach badawczych habilitant (po uzyskaniu stopnia doktora) realizował badania w ramach trzech stypendiów naukowych. Został uhonorowany przez Rektora Politechniki Gdańskiej trzema nagrodami za działalność naukową oraz dyplomem uznania. Jest laureatem nagrody za najlepsze referaty w cyklu seminaryjnym oraz najlepszą prezentacją konferencyjną. Habilitant pełnił funkcję recenzenta w renomowanych czasopismach branżowych wydawanych przez stowarzyszenia IEEE oraz IET. Był także biegłym sądowym w sprawie karnej.

Habilitant nawiązał współpracę z naukowcami z trzech ośrodków zagranicznych. Efektem tej współpracy są m.in. uwzględnione w *Wykazie dorobku habilitacyjnego* (Załącznik nr 3) referaty [IB6] oraz [IIE5] opracowane wraz z prof. S. Mirchevskim (*Ss. Cyril and Methodius University, Macedonia*) oraz artykuł [IB9] opracowany z prof. W.J. Kuleszą (*Blekinge Institute of Technology, Szwecja*). Obecnie trwają wspólne prace z prof. M. Guttenem (*University of Zilina, Słowacja*) w ramach projektu nr 2018/02/X/ST7/00488. Przygotowano m.in. wspólny referat zgłoszony na konferencję *International Electric Machines & Drives Conference*, która odbędzie się w dn. 12–15.05.2019 r. w San Diego (referat w recenzji).

Szczegółowe informacje dotyczące osiągnięć naukowych habilitanta podano w *Wykazie dorobku habilitacyjnego* (Załącznik nr 3 do *Wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego*).


.....
dr inż. Leszek Jarzębowicz