

KONRAD URBAŃSKI
POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY

ZAŁĄCZNIK 2

Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć
naukowych

Autoreferat

1. Imię i Nazwisko:

Konrad Urbański

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

- 1995: tytuł magistra inżyniera uzyskany na kierunku Elektrotechnika Politechniki Poznańskiej, na specjalności *Przetwarzanie i Użytkowanie Energii Elektrycznej* w specjalizacji *Automatyka Układów Napędowych*, praca pt. „*Badania symulacyjne napędu elektrycznego prądu stałego z wykorzystaniem stimulatora stanu*”
- 2003: stopień naukowy doktora nauk technicznych, w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie *automatyka i robotyka*, uzyskany na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej, praca pt. „*Sterowanie bezczujnikowe silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych*”

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych:

- 1995-2003: asystent w Zakładzie Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki (po reorganizacji: w Zakładzie Sterowania i Elektroniki Przemysłowej) Politechniki Poznańskiej (cały etat)
- 2003-2004: wykładowca w Zakładzie Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej (cały etat)
- 2004-obecnie: adiunkt, w Zakładzie Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej (cały etat)

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

a) Tytuł osiągnięcia naukowego

Cykl 11 publikacji powiązanych tematycznie pod wspólną nazwą:

Sterowanie bezczujnikowe wybranych typów silników elektrycznych

b) Publikacje lub inne prace-wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

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

Czasopisma z listy JCR:

- [1] Urbański K., Zawirski K., (2009), „*Position and speed estimation of SRM*”, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), Vol. 85, Nr. 7, pp. 173 – 176, PL ISSN 0033-2097
(*IF=0.196, pkt. MNiSW=6, mój udział: 60%*)
- [2] Urbański K., (2010), „*Odtwarzanie położenia w napędzie z SRM*”, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), Vol. 86, Nr. 2, pp. 175 – 178, PL ISSN 0033-2097
(*IF=0.242, pkt. MNiSW=13*)
- [3] Urbanski K., (2015), „*Sensorless control of PMSM for low speed range*”, COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 34 Issue 3, pp. 754 – 765, ISSN: 0332-1649
(*IF=0.44, pkt. MNiSW=15*)
- [4] Urbanski, K., Zawirski, K., (2015) „*Improved Method for Position Estimation Using a Two-Dimensional Scheduling Array.*” *Automatika – Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications* Vol. 56, Issue 3, pp. 331-340, ISSN: 0005-1144
(*IF=0.307, pkt. MNiSW=15, mój udział: 80%*)

Inne wydawnictwa naukowe:

- [5] Urbanski K., (2013), „*Position estimation for PMSM drive equipped with the motor choke*”, Przegląd Elektrotechniczny, no. 04, pp. 237–241, 2013, ISSN 0033-2097
(*Pkt. MNiSW=10*)
- [6] Urbański K., (2014), „*Odtwarzanie prędkości PMSM z wykorzystaniem obserwatora siły elektromotorycznej*”, Przegląd Elektrotechniczny, no. 06, pp. 172–177, 2014, ISSN 0033-2097, DOI: 10.12915/pe.2014.0632
(*Pkt. MNiSW=10*)

Recenzowane materiały konferencyjne:

- [7] Urbański K., Zawirski K., (2007), „*Sensorless control of SRM using position observer*”, Proc. of the 12th European Conference on Power Electronics and Applications EPE 2007, Aalborg, Dania, CD-ROM
(*Konferencja indeksowana na liście WoS, mój udział: 60%*)
- [8] Urbanski K., (2013), „*Sensorless control of PMSM fed through the sinusoidal filter*”, Proc. of the 15th European Conference on Power Electronics and Applications EPE'13 ECCE Europe, Lille, Francja, 3-5 September 2013, USB stick
- [9] Urbanski K., (2014), „*Comparison of Methods for Back EMF Estimation at Low Speed for PMSM Drive*”, Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics – Mechatronika 2014, Brno, Czech Republic, 3-5.12 2014, pp. 32-37, ISBN: 978-80-214-4817-9
(*Konferencja indeksowana na liście WoS*)
- [10] Urbanski K., (2015), “*Position Estimation at Zero Speed for PMSM Using Probabilistic Neural Network*”, Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Cybernetics – CYBCONF 2015, Gdynia, Poland, 24-26 June 2015, USB stick, ISBN: 978-1-4799-8321-6, <http://dx.doi.org/10.1109/CYBCConf.2015.7175972>
(*Konferencja indeksowana na liście WoS*)
- [11] Urbanski K., (2015), “*Sensorless Control of PMSM at Low Speed Range Using Reference Model*”, Proceedings of the 17th European Conference on Power Electronics and Applications EPE'15 ECCE Europe, Geneva, Switzerland, 8-10 September 2015, ISBN: 978-9075-8152-38 and CFP15850-USB

c) Omówienie celu naukowego ww. prac oraz osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Prezentowany cykl publikacji nosi tytuł: „**Sterowanie bezczujnikowe wybranych typów silników elektrycznych**”. Tytułowe „wybrane typy” silników to silnik reluktancyjny przełączalny (SRM - *Switched Reluctance Motor*) oraz silnik synchroniczny o magnesach trwałych (PMSM – *Permanent Magnet Synchronous Motor*), w szczególności o konstrukcji z magnesami umieszczonymi powierzchniowo. Wybór tych typów silników został podyktowany wciąż wzrastającym znaczeniem napędów z SRM lub PMSM, które są coraz powszechniej wykorzystywane zarówno w przemyśle, jak i w zastosowaniach domowych (w sprzęcie AGD, rekreacyjnych pojazdach o napędzie elektrycznym itp.), a wiele problemów związanych ze specyfiką ich sterowania nie zostało jeszcze w pełni rozwiązanych. Wymaganiem do działania napędu elementem struktur sterowania tych typów silników jest sygnał aktualnego położeniu wału silnika, który dostarcza – w typowej (*czujnikowej*) realizacji – czujnik położenia wału. Poprzez wyeliminowanie konieczności montażu tego czujnika, niezbędnego do realizacji algorytmów sterowania i zastąpienie go rozwiązaniem programowym (układami odtwarzającymi położenie), można zwiększyć zakres zastosowań tych napędów. Ponieważ na dzień dzisiejszy brakuje w literaturze koncepcji sterowania bezczujnikowego, która jednoznacznie górowałaby nad pozostałymi rozwiązaniami, zagadnienie sterowania bezczujnikowego jest wciąż aktualnym zadaniem badawczym. Silniki reluktancyjne ze względu na ich prostą budowę – brak magnesów oraz brak uzwojeń w wirniku – proponowane są jako elementy układów napędowych pracujących w ekstremalnych warunkach. Odporność na wstrząsy i wibracje, brak magnesów, możliwość pracy z wysokimi prędkościami są powodem, dla którego ten rodzaj silnika chętnie widziany jest jako źródło napędu pojazdów. Niekorzystnymi cechami SRM są m.in. wysokie tętnienia momentu oraz wysoki poziom generowanego hałasu, a także konieczność stosowania złożonego algorytmu sterowania, ze względu na dużą nieliniowość tego typu silnika. Do poprawnego działania SRM wymagana jest też informacja o położeniu wału. Algorytmy zmniejszające poziom tętnień momentu oraz struktury umożliwiające eliminację mechanicznego czujnika położenia wału są nieustannie rozwijane. W przedstawionym cyklu publikacji analizowany był zakres średnich prędkości oraz testowane były różne struktury obserwatorów. Dla tego typu silnika zostały opracowane nietypowe dla tego rodzaju napędu struktury odtwarzające położenie wału (projekty własne autora, w tym zgłoszenie patentowe¹). W przypadku silników synchronicznych o magnesach trwałych, ich obszar zastosowań także się wciąż powiększa. Od napędów obrabiarkowych, poprzez zastosowania w napędach trakcyjnych, w napędach wentylatorowych, pomp głębinowych, aż do zastosowań w sprzęcie gospodarstwa domowego, gdzie chętnie są wykorzystywane m.in. ze względu na cichą pracę, zwartą budowę i mały moment bezwładności. Aby w pełni wykorzystać takie zalety PMSM, jak wysoka sprawność oraz duża dynamika, konieczne jest użycie algorytmów sterowania wektorowego, które wymagają informacji o aktualnym położeniu wału. Napęd bezczujnikowy z PMSM badany był dla pełnego zakresu

¹ Urbański K.: "Sposób odtwarzania oraz układ odtwarzania położenia wału silnika reluktancyjnego przełączalnego dla napędu z SRM wyposażonego w histerezowy regulator prądu", **zgłoszenie patentowe** nr P.401759, 26.11.2012, UPRP (Polska)

prędkości, od prędkości niskich (rozwiązania autorskie, w tym zgłoszenie patentowe²) - w tym także dla prędkości bliskich zero oraz dla zatrzymanego wału - do prędkości wysokich, z uwzględnieniem różnych struktur toru silnoprządowego - bez dodatkowych elementów, z dławikiem silnikowym, z filtrem sinusoidalnym (zgłoszenie patentowe³), także z użyciem algorytmu modyfikacji parametrów obserwatora w funkcji punktu pracy napędu (*gain scheduling*).

Wyeliminowanie czujnika położenia wału umożliwia zmniejszenie kosztu napędu, może zwiększyć jego niezawodność, a zespół napędowy zachowuje zwartą konstrukcję. Istotną zaletą jest też zachowanie dostępności obu końców wału. Ze względu na rosnące zainteresowanie zagadnieniami sterowania opisanych typów silników, zespół badawczy złożył wnioski na granty badawcze. Wybrane wyniki badań realizowanych w ramach tych grantów zostały przedstawione w publikacjach, których lista została wyszczególniona w punkcie 4b niniejszego opracowania. Wyniki badań dotyczące napędu bezczujnikowego z SRM przedstawiono w publikacjach [1, 2, 7], a wyniki badań dotyczących napędu bezczujnikowego z PMSM przedstawiono w publikacjach [3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11].

Tematyka publikacji jest powiązana z chronologią projektów badawczych, realizowanych w Zakładzie. Moim podstawowym zadaniem w grantach było opracowanie i uruchomienie układu sterowania bezczujnikowego prędkością. Wymagało to zrealizowania poszczególnych etapów: opracowania modelu silnika, napędu oraz układu sterowania; przygotowania koncepcji układów odtwarzających położenie wału oraz przygotowania koncepcji wyznaczania prędkości; opracowania algorytmów doboru parametrów estymatora; uruchomienia układu bezczujnikowego sterowania w układzie otwartym (kiedy układ sterowania wciąż wykorzystuje do sterowania sygnały z czujnika położenia, a sygnały odtworzonego położenia i prędkości analizowane są pod względem poprawności odtwarzania) oraz w układzie zamkniętym, kiedy sygnały odtworzone użyte są zamiast wielkości mierzonych w torze sterowania maszyną. W układzie zamkniętym wielkości mierzone położenia i prędkości służą m.in. do oceny poprawności odtwarzania. Po pozytywnej weryfikacji symulacyjnej, wybrane metody sterowania bezczujnikowego implementowane były na stanowisku laboratoryjnym. Zakres prowadzonych badań obejmował struktury następujących układów odtwarzających położenie lub prędkość wału: prosty i zmodyfikowany obserwator Luenbergera, obserwator typu MRAS (*Model Reference Adaptive System*), układ sterowania z dodatkowymi sygnałami wysokiej częstotliwości, z użyciem sztucznej sieci neuronowej, z modyfikatorem sygnału (z wykorzystaniem korekty sygnałów odtwarzanych sinusa i cosinusa położenia). Testowano pracę systemów odtwarzających położenie lub prędkość wału w układzie otwartym i zamkniętym (dla sterowania momentem i dla sterowania prędkością). Badano pracę napędu bezczujnikowego dla zakresu prędkości średniej (dla zasilania silnika bezpośrednio z przekształtnika, z użyciem dławika silnikowego oraz z użyciem filtra sinusoidalnego), prędkości niskiej (prędkość rzędu pojedynczych obrotów na sekundę) oraz dla zatrzymanego wału. Uzyskanie stabilnej pracy w układzie regulacji (zwłaszcza w obecności

² Urbański K.: "Układ sterowania prędkością dla napędu z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych (PMSM)", **zgłoszenie patentowe** nr P.408733, 01.07.2014, UPRP (Polska)

³ Urbański K.: "Sposób odtwarzania położenia wału silnika synchronicznego o magnesach trwałych PMSM, zwłaszcza dla silnika zasilanego poprzez dławik silnikowy lub filtr sinusoidalny oraz układ do realizacji tego sposobu", **zgłoszenie patentowe** nr P.404195, 04.06.2013, UPRP (Polska)

zakłóceń oraz w stanach przejściowych) w zamkniętym trybie sterowania bezczujnikowego jest dużo trudniejsze niż w trybie otwartym. Oceniając strukturę sterowania bezczujnikowego należy zwrócić dodatkowo uwagę na to, czy układ sterowania bezczujnikowego obejmuje tylko pętlę sterowania momentem, czy też pętlę sterowania prędkością. Ograniczenie sterowania bezczujnikowego tylko do pętli sterowania momentem (np. w przypadku, kiedy obciążenie/maszyna robocza wymusza prędkość), znacząco ułatwia uzyskanie poprawnej, stabilnej pracy napędu. Omówione w niniejszym cyklu prace dotyczą układów sterowania prędkością, wymagane jest więc zazwyczaj nie tylko wyznaczenie położenia wału, ale i prędkości.

Celem naukowym pracy było opracowanie oryginalnych, niespotykanych w literaturze metod i układów sterowania bezczujnikowego dla silnika reluktancyjnego przełączalnego oraz dla silnika synchronicznego o magnesach trwałych. Założono różne zakresy prędkości, a także różne sposoby zasilania, dla których miał być uruchomiony opracowany napęd bezczujnikowy.

Kolejność omawiania przedstawionych w punkcie 4b publikacji jest zgodna z chronologią badań.

ad. [7] Urbański K., Zawirski K., (2007), „*Sensorless control of SRM using position observer*”, Proc. of the 12th European Conference on Power Electronics and Applications EPE 2007, Aalborg, Dania, CD-ROM

W pracy przedstawiono wyniki badań opracowanej koncepcji sterowania bezczujnikowego układu regulacji prędkości z wykorzystaniem obserwatora, w którym wyznaczenie położenia odbywa się w dwóch etapach. W pierwszym wyznaczane są prądy i siły elektromotoryczne (SEM) poszczególnych pasm. W kolejnym etapie, bazując na wyznaczonej wartości „globalnego” błędu prądów pasm, zdefiniowanego jako suma wartości bezwzględnych błędów składowych dla poszczególnych pasm, odtwarzana jest wartość położenia wału $\hat{\Theta}_{obs}$. Taka struktura układu odtwarzającego położenie, umożliwiła wprowadzanie w trakcie obliczeń poprawki kątowej $\Delta\Theta_{obs}$. Poprzez dodanie poprawki $\Delta\Theta_{obs}$ do wielkości $\hat{\Theta}_{obs}$, uzyskiwana jest wielkość położenia $\hat{\Theta}_{ctrl}$, która wykorzystywana jest następnie w torze sterowania. Równania SRM użyte w obserwatorze jak i w opisie silnika w modelu napędu uwzględniają nieliniowość spowodowaną nasyceniem się obwodów magnetycznych. Wykorzystany do wyznaczania prądów i SEM pasm, a także położenia wału obserwator, bazuje na strukturze (liniowego) obserwatora Luenbergera – wartości odtwarzanych prądów wyznaczane są na bazie równania silnika (model silnika jest nieliniowy) oraz sygnału korekcyjnego, proporcjonalnego do błędu odtwarzania prądu pasma. Założono, że dopuszczalnym uproszczeniem jest przyjęcie zerowej wartości pochodnej SEM w danym kroku obliczeń, a więc wartość odtworzonej SEM w poszczególnym paśmie, jest proporcjonalna do błędu odtwarzania prądu pasma. Założenie to, jakkolwiek w przypadku napędów o dużej dynamice mogłoby powodować duże błędy odtwarzania, okazało się uprawnione, a układ odtwarzający położenie pracuje poprawnie. Analogicznie, wartość odtworzonego położenia wału jest proporcjonalna wyłącznie do globalnego błędu prądów. Sygnał prędkości dla regulatora wyznaczany jest z pochodnej odtwarzanego położenia i filtrowany. Przeprowadzone testy symulacyjne napędu bezczujnikowego w układzie regulacji prędkości, pracującego w układzie

zamkniętym wykazały prawidłową pracę napędu oraz dużą odporność układu odtwarzającego położenie na błąd oszacowania parametrów silnika. Model silnika był przeliczany z krokiem 1 μ s, co w założeniu symulowało quasi-ciągły charakter modelu silnika, natomiast układ sterujący obliczany był z „dużym” krokiem 20 μ s, charakteryzującym krok obliczeń w planowanej dyskretnej realizacji układu sterującego w laboratoryjnym stanowisku badawczym.

ad. [1] Urbański K., Zawirski K., (2009), „*Position and speed estimation of SRM*”, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), Vol. 85, Nr. 7, pp. 173 – 176, PL ISSN 0033-2097

W artykule zaprezentowano koncepcję układu bezczujnikowej regulacji prędkości, której istotnym elementem jest obserwator prędkości – dla każdego pasma niezależny. Prędkość wału silnika wyznaczana jest za pomocą sumy ważonej wartości prędkości wszystkich pasm. Położenie odtworzone wału wyznaczane jest poprzez całkowanie prędkości odtworzonej. Przedstawiony model napędu w istotny sposób różni się od przedstawionego w poprzedniej pracy. Zarówno w modelu silnika, jak i w obserwatorze zastosowano inny sposób zapisu równań silnika – zamiast nieliniowej funkcji kilku zmiennych, zastosowano złożenie nieliniowych funkcji tylko jednej zmiennej. Wpłynęło to na uproszczenie modelu oraz zwiększyło szybkość symulacji. Dodatkowo, istotną zaletą takiego zapisu może być łatwiejsza implementacja algorytmu sterowania w języku programowania dla kontrolera sterującego napędem w realizacji laboratoryjnej układu. Program realizujący obliczenia obserwatora został zapisany jako *m-plik*, co w założeniu miało umożliwić szybką konwersję do języka C, używanego do programowania układu mikroprocesorowego z DSP, będącego jednym z elementów składowych modułu sterowania w stanowisku laboratoryjnym.

Obserwator bazuje na strukturze obserwatora Luenbergera, w którym odtwarzane prądy pasm wyznaczone są na bazie równania silnika oraz sygnału korekcyjnego, proporcjonalnego do błędu odtwarzania prądu danego pasma. Wartość siły elektromotorycznej wyznaczonej w obserwatorze podawana jest wprost z równania opisującego SEM – ale na podstawie odtworzonej wartości położenia i prędkości, z krokiem obliczeń układu sterowania (innym niż krok obliczeń modelu silnika). Istotną cechą prezentowanego modelu napędu, wpływającą na zwiększenie poziomu trudności dla realizacji pracy bezczujnikowej jest zastosowanie histerezowego regulatora prądu. Uwzględniono, że regulator ten jest realizowany sprzętowo i nie ma dostępu do wartości mierzonych prądów. Uniemożliwia to użycie napięć zadanych w miejsce mierzonych, jak to może być realizowane w przypadku napędów z regulatorami prądów typu PI. Zastosowano więc układ wyznaczający napięcie m.in. na podstawie czasów załączenia kluczy. Nie mając dostępu do wartości mierzonych prądów pasm, zastosowano algorytm symulujący te prądy, poprzez odpowiednie kluczkowanie prądu zadanego, odpowiednio do położenia wału. Symulacje wykazały, że w ten sposób przygotowane sygnały wejściowe obserwatora, pełniące funkcję wartości mierzonych, umożliwiają poprawną pracę obserwatora oraz napędu, zarówno w trybie bezczujnikowym otwartym, jak i zamkniętym. Zgodność wartości chwilowych SEM oraz prądów pasm - rzeczywistych oraz odtwarzanych - jest wystarczająca do uzyskania poprawnej pracy

bezczylnikowej w układzie zamkniętym. Dodatkowo, w układzie zamkniętym, nie ma istotnego pogorszenia jakości odtwarzania prądów i SEM, w porównaniu do układu otwartego. Parametry obserwatora wyznaczono z użyciem algorytmu losowego, który został szerzej opisany w [4]. Wykazano, że opracowany napęd bezczylnikowy może zostać uruchomiony także w przypadku początkowej niezgodności położenia wału rzeczywistego i odtworzonego. Model silnika był przeliczany z krokiem $0,1 \mu\text{s}$, co w założeniu symulowało quasi-ciągły charakter modelu silnika, natomiast układ sterujący wraz z obserwatorem obliczany był z „dużym” krokiem $100 \mu\text{s}$. Możliwość znacznego zwiększenia kroku obliczeń toru sterowania, w porównaniu do kroku użytego w pracy [7] przy zachowaniu stabilnej pracy w układzie zamkniętym, wskazuje na istotne ulepszenie struktury prezentowanego rozwiązania obserwatora.

ad. [2] Urbański K., (2010), „Odtwarzanie położenia w napędzie z SRM”, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), Vol. 86, Nr. 2, pp. 175 – 178, PL ISSN 0033-2097

Prezentowany artykuł opisuje koncepcję odtwarzania położenia wału SRM z wykorzystaniem obserwatora typu MRAS. W napędzie zastosowano histerezowy regulator prądu. Założono, że regulator ten jest realizowany sprzętowo i nie ma dostępu do wartości mierzonych prądów. Istotną cechą układu zaprezentowanego w pracy jest struktura obserwatora, niestosowana wcześniej w układzie odtwarzania położenia wału SRM. W prezentowanym obserwatorze sygnałami wejściowymi są prądy zadane pasm (przygotowane poprzez odpowiednie kluczkowanie prądu zadanego w funkcji położenia wału), napięcia pasm oraz wyznaczona przez moduł proporcjonalno-całkujący wielkość adaptowana – położenie wału – niezależnie dla każdego pasma. Mając za punkt wyjścia układy równań SRM zapisane w różnych postaciach, można na dwa sposoby zapisać równanie opisujące strumień skojarzony stojana. Opisaną w pracy postać Ψ^* wyznaczono z zależności całkowitej prądowo-napięciowej, a postać $\hat{\Psi}$ z zależności w funkcji prądu i położenia. Obserwator działa w ten sposób, że modyfikuje wartość położenia (odtworzanego) tak, aby likwidować różnicę wartości strumieni wyznaczanych z tych różnych zależności. Zakłada się, że wartością odtworzoną położenia jest taka jego wartość, dla której strumień wyznaczony z obu powyższych zależności ma tę samą wartość. Przeprowadziłem testy symulacyjne działania bezczylnikowego układu regulacji prędkości z SRM z obserwatorem tego typu i wykazałem poprawną pracę napędu podczas rozruchu, w stanie ustalonym, a także w warunkach skokowego załączania znamionowego momentu obciążenia. Strumień oraz położenie wału są odtwarzane z dokładnością umożliwiającą poprawną pracę napędu. Ważną cechą układu odtwarzającego położenie jest poprawna praca, pomimo zastosowania rozwiązań, które zazwyczaj powodują problemy z dokładnością odtwarzania lub uniemożliwiają poprawną pracę obserwatorów, np. użycia prądu zadanego zamiast prądów mierzonych, czy podawanie skokowo zmieniających się wartości napięcia. Model silnika obliczany jest z krokiem $1 \mu\text{s}$. Układ wyznaczający położenie wału realizuje obliczenia ze stosunkowo dużym krokiem $100 \mu\text{s}$, w porównaniu np. do czasu załączenia prądu pasma, który wynosi $130 \mu\text{s}$ dla przypadku prezentowanego w artykule.

Tego rodzaju obserwator nie był dotychczas prezentowany w publikacjach naukowych w kontekście bezczujnikowej regulacji prędkości SRM. W roku 2012 sposób odtwarzania położenia wału z użyciem obserwatora MRAS został **zgłoszony do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej**¹. W roku 2013 „Sprawozdanie o stanie techniki zgłoszenia...” wykazało dokumenty kategorii „A” – „dokument stanowiący znany stan techniki, ale niepodważający nowości i poziomu wynalazczego wynalazku”. Aktualnie zgłoszenie posiada status „postępowanie w toku”.

ad. [5] Urbanski K., (2013), „*Position estimation for PMSM drive equipped with the motor choke,*” Przegląd Elektrotechniczny, no. 04, pp. 237–241, 2013, ISSN 0033-2097

Prezentowany artykuł przedstawia zagadnienia bezczujnikowej regulacji prędkości napędu z PMSM, zasilanego poprzez dławik silnikowy. Mimo takiej konfiguracji zasilania silnika, sterowanie jest realizowane przy użyciu typowego, bezczujnikowego układu sterowania wektorowego, z podporządkowanym torem regulacji prądów dq w układzie wirującym zgodnie z wirnikiem oraz nadrzędnym obwodem regulacji prędkości. Użycie typowej struktury sterowania wektorowego, w konfiguracji zasilania z dławikiem silnikowym i w połączeniu z obserwatorem SEM rotacji, jest oryginalnym osiągnięciem, które nie było dotąd przedstawiane w literaturze. W miejsce sygnałów położenia z czujnika wykorzystywane są sygnały odtwarzane w obserwatorze. Sygnałami wejściowymi obserwatora są wartości zmierzonych prądów oraz wartości zadanych napięć. Użycie napięcia zadanego w miejsce mierzonego umożliwia uzyskanie „gładkich” przebiegów wyjściowych obserwatora, co nie byłoby możliwe w przypadku, kiedy podawano by na wejście obserwatora napięcie mierzone na zaciskach (wyjściowych) przekształtnika. Ewentualne zastosowanie filtracji napięcia mierzonego, wprowadziłoby dodatkowe opóźnienie, co wpłynęłoby na konieczność dodatkowego ograniczenia dynamiki regulatora prędkości. Jakkolwiek wybrane aspekty zagadnienia bezczujnikowego sterowania PMSM były tematyką prac przed uzyskaniem stopnia doktora, omawiana praca określa nowy obszar zagadnień, zdecydowanie różniący się od tych badanych przeze mnie przed rokiem 2003. Tym nowym obszarem eksplorowanym w serii kilku kolejnych prac, było sterowanie bezczujnikowe w konfiguracji, w której pomiędzy silnikiem a przekształtnikiem umieszczony był dławik silnikowy (a w kolejnych pracach – filtr sinusoidalny). Ten dodatkowy element w torze silnoprądowym stosuje się w celu wydłużenia czasu eksploatacji maszyny lub m.in. w przypadku zasilania silnika z użyciem długich przewodów. Zgodnie z literaturą, umieszczenie pomiędzy przekształtnikiem a silnikiem dławika (lub filtru sinusoidalnego), wymaga albo modyfikacji toru sterowania, albo uwzględnienia dławika w strukturze obserwatora. W prezentowanej pracy wykazałem, że istnieje kolejny sposób sterowania bezczujnikowego dla napędu z PMSM zasilanego za pośrednictwem dławika silnikowego. Badania symulacyjne, a później weryfikacja w laboratorium wykazały, że obserwator położenia realizowany na bazie zmodyfikowanej struktury obserwatora Luenbergera, ze sprzężeniem korekcyjnym typu PII² (tak zmodyfikowany obserwator Luenbergera wykorzystywałem już wcześniej w innych pracach), umożliwia poprawną pracę napędu bezczujnikowego bez konieczności modyfikacji struktury sterowania napędem, jak i bez konieczności uwzględnienia dławika w strukturze obserwatora.

Poprzez odpowiedni dobór parametrów obserwatora o odpowiedniej strukturze, wykorzystywanej uprzednio w napędzie bezczujnikowym z silnikiem zasilanym bezpośrednio, można uzyskać poprawną pracę napędu bezczujnikowego. Zastosowany układ obserwatora odtwarza wartości SEM w osiach $\alpha\beta$ stacjonarnego układu współrzędnych skojarzonego ze stojanem, a następnie na ich podstawie wyliczane są sinus i cosinus położenia wału, wykorzystywane dalej w blokach transformacji układów współrzędnych. Aby przeprowadzić badania konieczne było uzupełnienie stanowiska laboratoryjnego o dławik silnikowy. Opracowałem więc strukturę i wyznaczyłem parametry dławika/filtru. Wybrałem opisywaną w literaturze metodę „inżynierską”, bazującą na określeniu parametrów dławika na podstawie kryterium dopuszczalnych strat. Następnym etapem było zaprojektowanie konstrukcji uniwersalnego modułu laboratoryjnego, która miała umożliwiać szybką rekonfigurację sposobu zasilania silnika: bezpośrednio, z dławikiem silnikowym, z filtrem sinusoidalnym. Parametry obserwatora były dobierane za pomocą algorytmu losowego, modyfikującego parametry w zależności od wartości wskaźnika jakości wyznaczanego podczas wielokrotnych powtórzeń symulowanych rozruchów modelu napędu. W zależności od wylosowanych wartości początkowych parametrów, spełnienie warunku zakończenia wyszukiwania wymagało przeprowadzenia od kilkuset cykli symulacji, do kilku tysięcy cykli. Tak wyznaczone symulacyjnie parametry obserwatora mogły być przeniesione do układu laboratoryjnego, wymagając zazwyczaj niewielkich korekt. Parametry obserwatora umożliwiały pracę napędu w określonym zakresie zmian punktu pracy. Dla uzyskania pełnego zakresu zmian prędkości i obciążenia, wymagana jest modyfikacja parametrów obserwatora w funkcji punktu pracy (*gain scheduling*), co zostało zrealizowane i opisane w [4]. Badania symulacyjne przeprowadzono z krokiem obliczeń 0,1 μs dla modelu silnika, natomiast układ sterowania łącznie z obserwatorem z krokiem 100 μs . Takie wartości kroku obliczeń toru sterowania odpowiadają wartościom układu laboratoryjnego: częstotliwość PWM – 10 kHz, okres próbkowania wielkości pomiarowych oraz krok obliczeń toru sterującego i obserwatora – 100 μs . Do sygnałów „pomiarowych” prądów wprowadzono zakłócenie w postaci szumu. Zamodelowano także czas martwy przekształtnika o wartości 4 μs . Badania symulacyjne wykazały skuteczność koncepcji, a eksperyment potwierdził wyniki symulacyjne. Uzyskano wysoką zgodność wartości mierzonych i odtwarzanych położenia, napęd pracował stabilnie, pomimo tego, że napięcie wykorzystywane w obserwatorem różni się od napięcia na zaciskach silnika. Różnica ta wynika nie tylko z tego, że wykorzystywane jest napięcie zadane w miejsce mierzonego (zazwyczaj mierzone jest napięcie na zaciskach przekształtnika), ale przede wszystkim z faktu dodatkowego spadku napięcia na rezystancji i indukcyjności dławika. Pomimo tych różnic, wektorowy układ regulacji prędkości z proponowanym obserwatorem cechuje się poprawną pracą.

ad. [8] Urbanski K., (2013), „Sensorless control of PMSM fed through the sinusoidal filter”, Proc. of the 15th European Conference on Power Electronics and Applications EPE'13 ECCE Europe, Lille, Francja, 3-5 September 2013

Kolejnym etapem badań następującym po testach z dławikiem silnikowym [5] było badanie układu z filtrem sinusoidalnym. Zmieniona została konfiguracja zasilania, ale inne elementy toru

sterowania silnikiem pozostały bez zmian. Tak jak w przypadku opisanym w [5], pomimo konfiguracji zasilania silnika poprzez filtr LC, sterowanie jest realizowane przy użyciu typowego, bezczujnikowego układu sterowania wektorowego, a użycie typowej struktury sterowania, w konfiguracji zasilania z filtrem LC i w połączeniu z obserwatorem SEM rotacji, jest oryginalnym osiągnięciem, które nie było dotąd przedstawiane w literaturze. Wykorzystałem podobnie jak dla układu z dławikiem, obserwator wyznaczający położenie z odtworzonych wartości SEM o korekcji typu PII² (ten rodzaj obserwatora wykorzystywany był także we wcześniejszych pracach). Została uruchomiona ponownie procedura doboru parametrów obserwatora. Poprawność procesu odtwarzania położenia została sprawdzona symulacyjnie, a następnie przeprowadzono weryfikację eksperymentalną założeń układu. Badania symulacyjne przeprowadzono z krokiem obliczeń 0,1 μ s dla modelu silnika. Model przekształtnika pracował z sygnałem nośnym o częstotliwość 10 kHz i z czasem martwym 4 μ s, okres próbkowania wielkości pomiarowych oraz krok obliczeń toru sterującego i obserwatora wynosił 100 μ s, analogicznie jak w przypadku stanowiska laboratoryjnego. Sygnały „pomiarowe” prądów zostały dodatkowo zakłócone w celu sprawdzenia odporności obserwatora na obecność zakłóceń. Parametry filtru sinusoidalnego zostały dobrane tak, że jego częstotliwość rezonansowa wynosi około 600 Hz. W ten sposób spełniony jest warunek, że jego częstotliwość rezonansowa jest kilkukrotnie większa od częstotliwości podstawowej i kilkukrotnie mniejsza, od częstotliwości nośnej przekształtnika. Badania symulacyjne wykazały, że pomimo wprowadzenia w pomiarze prądów zakłóceń, które utrudniają uzyskanie „gładkiej” wielkości odtworzonego położenia (co jest bardzo ważne, aby uniknąć wzbudzenia oscylacji w torze sterowania), układ zamknięty pracuje poprawnie. Jest to istotna cecha, mając na uwadze, że obserwator, który jest odpowiednio przekształconym modelem obiektu (silnika) uzupełnionym o korekcyjne sprzężenia zwrotne, do obliczeń w przypadku zasilania silnika za pośrednictwem filtru LC, wykorzystuje inne wartości napięć i prądów niż występujące na zaciskach silnika. Wartość napięcia podawana na wejście obserwatora to napięcie zadane, różniące się od napięcia występującego na zaciskach silnika (analogicznie jak dla układu z dławikiem). Także wartość prądu jest inna na zaciskach przekształtnika i inna na zaciskach silnika (dla odpowiednich faz), ze względu na obecność kondensatorów filtru połączonych równolegle do PMSM. Oznacza to, że poprzez odpowiedni dobór parametrów obserwatora, można skompensować opisane powyżej różnice prądów i napięć, zachowując niską wartość błędu odtwarzania położenia wału, a z „gładkich” wartości odtworzonych SEM można wyliczyć prędkość tak, aby nie pobudzać dodatkowy oscylacji w torze sterowania. W przedstawionym sposobie sterowania prędkość wyznaczana jest na podstawie długości odtworzonych wartości chwilowych składowych sił elektromotorycznych w stacjonarnym układzie współrzędnych $\alpha\beta$. Wyniki symulacyjne zostały zweryfikowane eksperymentalnie. Przeprowadzono testy dla różnych prędkości dla obciążonego silnika. Wykazano, że proponowany sposób sterowania działa poprawnie, wpływ oddziaływania filtru silnikowego jest wyraźnie widoczny w przebiegach napięcia, a układ obserwatora umożliwia pracę napędu, pomimo tego, że struktura toru sterowania oraz obserwator mają postać identyczną do tej, jaka może być zastosowana w silniku zasilanym bezpośrednio z przekształtnika, lub za pośrednictwem

dławika silnikowego. Dostosowanie układu sterowania do charakteru zasilania polega na odpowiednim doborze parametrów obserwatora. Parametry obserwatora zostały dobrane za pomocą algorytmu losowego, który został szerzej opisany w [4].

Zaprezentowane rozwiązanie układu sterowania bezczujnikowego z PMSM zasilanego poprzez dławik silnikowy lub filtr sinusoidalny nie było dotychczas prezentowane w publikacjach naukowych. W roku 2013 opisany powyżej w publikacjach [5] i [8] sposób odtwarzania położenia wału dla PMSM został **zgłoszony do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej**³. W roku 2014 „Sprawozdanie o stanie techniki zgłoszenia...” wykazało dokumenty kategorii „A” – „dokument stanowiący znany stan techniki niepodważający nowości i poziomu wynalazczego”. Aktualnie zgłoszenie posiada status „oczekuje na badanie”.

ad. [6] Urbański K., (2014), „Odtwarzanie prędkości PMSM z wykorzystaniem obserwatora siły elektromotorycznej”, Przegląd Elektrotechniczny, no. 06, pp. 172–177, 2014, ISSN 0033-2097, DOI: 10.12915/pe.2014.0632

Zaprezentowany artykuł różni się w sposobie przedstawiania wyników naukowych od poprzednich publikacji. Jest pierwszym artykułem będącym podsumowaniem uzyskanych dotychczas wyników badań napędu bezczujnikowego z PMSM. Zakres przedstawionych w pracy zagadnień obejmuje metody odtwarzania położenia i prędkości wału, które wykorzystują wartości odtworzonych sił elektromotorycznych w osiach α i β stacjonarnego układu współrzędnych skojarzonego ze stojanem. Przedstawiłem sposób przekształcenia modelu silnika w obserwator SEM z uwzględnieniem modyfikacji funkcji korekcyjnego sprzężenia zwrotnego obserwatora oraz sposoby wyznaczania położenia i prędkości. Zasygnalizowałem też możliwość sterowania bezczujnikowego PMSM dla konfiguracji zasilania silnika poprzez filtr LC. Nie zabrakło jednak w artykule także nowych elementów, nieopisywanych w poprzednich pracach. Zaprezentowałem funkcję jakości wykorzystywaną w ostatnich pracach w algorytmie doboru parametrów obserwatora. Wskazałem też na konieczność rozdzielenia zagadnień odtwarzania położenia od zagadnień wyznaczania prędkości w kontekście układu bezczujnikowego. Jest to istotne zwłaszcza w zakresie pracy z niskimi prędkościami. W takich warunkach metoda wyznaczania prędkości z odtworzonych SEM ma kluczowe znaczenie dla uzyskania poprawnej i stabilnej pracy napędu bezczujnikowego. Przedstawiłem wybrane metody wyznaczania prędkości, ich cechy oraz przykładowe oscylogramy uzyskane podczas badań wykorzystujących daną metodę. Przedstawiłem typową metodę bazującą na wyznaczeniu pochodnej położenia, jej uproszczenie oraz metodę wyznaczania prędkości z wektora siły elektromotorycznej. Skuteczność metody jednokrokowej, bazującej na SEM zilustrowałem przebiegami dla prędkości rzędu kilkunastu rad/s. Zaprezentowałem metodę uproszczoną wyznaczania prędkości, która wykorzystuje do obliczeń wyznaczone wielkości sinusa i cosinusa położenia. Podstawową zaletą tej metody jest wyeliminowanie konieczności obliczania funkcji trygonometrycznej (zazwyczaj w prostych systemach mikroprocesorowych są to zadania czasochłonne). Opisałem wpływ doboru parametrów wagowych funkcji jakości na kształt uzyskanych przebiegów. Wiąże się to z pojęciem

„wiedzy eksperckiej” i wymaga pewnego doświadczenia badacza. Istotną cechą prezentowanego zmodyfikowanego obserwatora Luenbergera (modyfikacja ta była wykorzystywana także w poprzednich pracach) jest możliwość nie tylko zmniejszenia błędu odtwarzania położenia (w porównaniu do obserwatora z korektą typu proporcjonalnego) poprzez odpowiedni dobór parametrów, ale i możliwość zmiany znaku błędu. Ta cecha obserwatora z korekcją typu PII^2 nie była wcześniej sygnalizowana w pracach innych badaczy układów sterowania napędami bezczujnikowymi. Zaprezentowane przebiegi dotyczące powyższej cechy zostały zrealizowane z użyciem układu sterowania wykorzystującego płynną zmianę parametrów obserwatora w funkcji punktu pracy napędu. Zostało to szerzej opisane w [4].

ad. [9] Urbanski K., (2014), „*Comparison of Methods for Back EMF Estimation at Low Speed for PMSM Drive*”, Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics – Mechatronika 2014, Brno, Czech Republic, 3-5.12 2014, pp. 32-37, ISBN: 978-80-214-4817-9

Artykuł zaprezentowany pod koniec roku 2014 na konferencji w Brnie, rozpoczyna serię artykułów dotyczących kolejnego zagadnienia badawczego – sterowania bezczujnikowego PMSM w zakresie niskich prędkości z wykorzystaniem obserwatora SEM. Z lektury artykułów naukowych poświęconych temu zagadnieniu wynika, że odtworzenie położenia z SEM w zakresie niskich prędkości jest albo bardzo trudne, albo niemożliwe do wykonania. Podstawowym argumentem, podnoszonym w tych artykułach – uzasadniającym użycie metod fizykalnych w sterowaniu bezczujnikowym – jest wysoki poziom zakłóceń w porównaniu do wartości odtwarzanej amplitudy SEM. Miałyby to uniemożliwiać poprawne odtworzenie siły elektromotorycznej, a więc i poprawne odtworzenie położenia. Dokonałem analizy wybranych aspektów tego zagadnienia, a opisywany artykuł jest podsumowaniem tych badań, zrealizowanych na stanowisku laboratoryjnym. Sprawdziłem, jaki charakter mają uzyskane przebiegi odtworzonej SEM dla wybranych struktur układu odtwarzającego położenie i/lub prędkość, oraz przedstawiłem wnioski określające cechy, jakimi powinien charakteryzować się układ sterowania dla tego obszaru pracy. Przetestowano trzy struktury układu odtwarzającego SEM. Jako układ odniesienia wykorzystano obserwator Luenbergera z proporcjonalną funkcją korekcji, kolejnym obiektem był zmodyfikowany obserwator Luenbergera z funkcją korekcji typu PI. Dla badanego zakresu prędkości wykorzystanie korekcji typu PII^2 (modyfikacja toru korekcji obserwatora była wykorzystywana także w poprzednich pracach) nie dawało znaczącej poprawy działania. Jako trzeci testowany był odpowiednio przekształcony model silnika (symulator). Wszystkie badania zrealizowane były doświadczalnie. W układzie sterowania (regulatory oraz obserwator) zastosowano krok obliczeń równy $100 \mu s$, który odpowiada częstotliwości PWM – 10 kHz. Wykazałem, że wartość położenia, w jakości umożliwiającej zastosowanie w torze sterowania można uzyskać tylko z obserwatorów, a dodatkowo obserwator ze zmodyfikowaną funkcją korekcji jest bardziej odporny na obecność zakłóceń w mierzonych sygnałach. W przypadku hamowania aż do zatrzymania wału, SEM wyznaczona w obserwatorze nie maleje do zera. Odtwarzana przez badane struktury obserwatorów siła elektromotoryczna cechuje się brakiem zakłóceń o charakterze szumu pomiarowego oraz znaczną zawartością harmoniczną, co jednak nie uniemożliwia odtworzenia

z odpowiednią dokładnością chwilowego położenia wału. Cechą mającą szczególne znaczenie dla odtwarzania prędkości jest brak wyraźnego powiązania amplitudy odtworzonej SEM z prędkością (w tym zakresie prędkości). Ostatnia cecha wskazuje na to, że metoda wyznaczania prędkości z długości wektora SEM nie może dać w tym wypadku pozytywnych rezultatów. Ważnym wnioskiem jest to, że możliwe jest poprawne odtwarzanie położenia pomimo zawartości harmoniczných w odtworzonej SEM. Uzyskanie poprawnej pracy w układzie regulacji prędkości wymaga jednak użycia alternatywnej metody wyznaczania prędkości (lub metody generowania momentu zadanego). Owe alternatywne metody zostały zaprezentowane w kolejnych publikacjach.

ad. [3] Urbanski K., (2015), „*Sensorless control of PMSM for low speed range*”, COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 34 Issue 3, pp. 754 – 765, ISSN: 0332-1649

W artykule przedstawiono koncepcję rozwiązania problemu obliczania prędkości z wartości odtworzonych SEM w warunkach pracy w zakresie niskich prędkości. W [9] wykazano, że w zakresie niskich prędkości, jakkolwiek odtworzenie położenia wału silnika z odpowiednią dla pracy bezczujnikowej jakością nie stanowi szczególnego wyzwania, to wyznaczenie prędkości z długości wektora SEM nie daje pozytywnych rezultatów, ze względu na brak w tym zakresie prędkości wyraźnego powiązania amplitudy odtworzonej SEM z prędkością. Zaprezentowałem oscylogram ilustrujący tezę, że dokładność odtwarzania położenia na bazie SEM jest wystarczająca. Przedstawia on przebiegi wybranych wielkości układu bezczujnikowego, pracującego bez pomiaru/odtworzenia prędkości. Dla układu sterowania ze stałą wartością zadanego prądu w osi q , uzyskano stabilną pracę silnika, jednak z oscylacjami prędkości. Ich przyczyna jest zrozumiała po zapoznaniu się z przebiegiem prądu osi q w pracy czujnikowej: przy tak niskiej prędkości, dla utrzymania jej stałej wartości, prąd musi być stale korygowany. Zadawanie stałej wartości prądu, musi skutkować zmianą chwilowej wartości prędkości. Z wyników testów przeprowadzonych na stanowisku laboratoryjnym można więc wysnuć wnioski potwierdzające tezę, że możliwe jest poprawne odtwarzanie położenia pomimo zawartości harmoniczných w odtworzonej SEM, jednak w przypadku pracy w układzie regulacji prędkości, konieczne jest użycie innego sposobu wyznaczania prędkości niż polegającego na wyznaczeniu długości wektora SEM.

Badania opracowanej koncepcji były realizowane dwuetapowo. W pierwszym etapie zarejestrowano wartości chwilowe odtworzonej siły elektromotorycznej układu laboratoryjnego, podczas testu polegającego na sekwencji skokowej zmiany prędkości zadanej napędu pracującego w trybie czujnikowym, a następnie wyeksportowano dane do środowiska symulacyjnego. Źródłem sygnałów odtworzonej SEM był obserwator Luenbergera ze zmodyfikowaną funkcją korekcji o charakterze proporcjonalno-całkującym. Drugi etap polegał na przeprowadzeniu obliczeń na modelu komputerowym napędu (z użyciem uzyskanych wcześniej danych eksperymentalnych). Ustalono, że wartość chwilowa odkształcenia – różnicy pomiędzy znormalizowaną wartością odtworzonej SEM dla danego kierunku układu współrzędnych, a teoretyczną (idealną) sinusoidą znormalizowanej SEM – jest powiązana z aktualnym położeniem

wał. Zaproponowane rozwiązanie polega na korygowaniu odkształcenia poprzez dodanie do odtworzonej SEM zależnej od położenia stabilizowanej poprawki, którą wyznaczono tak, aby uzyskać stałą wartość długości znormalizowanego wektora SEM. Następnie, „gładka” już postać zmodyfikowanej SEM poddawana jest operacji różniczkowania, uzyskując przebieg o zmiennej, zależnej od częstotliwości (a więc i od prędkości) amplitudzie. Po odfiltrowaniu wyższych harmonicznnych, na podstawie uzyskanych wartości zmodyfikowanych $\hat{e}_{\alpha 2}$ i $\hat{e}_{\beta 2}$ można wyznaczyć już długość wektora SEM, która odpowiada prędkości PMSM. W artykule filtrowanie jest realizowane z użyciem filtru Kalmana, w jego najprostszej, dyskretnej postaci. Wykorzystanie w filtrze macierzy stanu w postaci macierzy jednostkowej sprawdziło się, jednak uzyskana dynamika nie jest jeszcze zadowalająca. Planowana jest w kolejnych implementacjach modyfikacja macierzy stanu tak, aby zawrzeć w niej odpowiednio równania opisujące PMSM, co powinno wpłynąć na poprawę jakości filtrowania (rozumianej jako zmniejszenie obwiedni sygnału oraz zmniejszeniu czasu opóźnienia), co powinno zwiększyć dynamikę napędu dzięki zmniejszonym opóźnieniom w wyznaczaniu prędkości.

ad. [11] Urbanski K., (2015), “*Sensorless Control of PMSM at Low Speed Range Using Reference Model*”, Proceedings of the 17th European Conference on Power Electronics and Applications EPE'15 ECCE Europe, Geneva, Switzerland, 8-10 September 2015, ISBN: 978-9075-8152-38 and CFP15850-USB

Na konferencji w Genewie zaprezentowałem niestosowaną wcześniej koncepcję sterowania bezczujnikowego którą opracowałem, aby umożliwić pracę napędu w zakresie niskiej prędkości, rzędu pojedynczych obrotów na sekundę. Cechą szczególną tej koncepcji sterowania jest wyeliminowanie konieczności odtwarzania prędkości, pomimo tego, że jest to układ regulacji prędkości. Układ sterowania wykorzystuje obserwator tylko w celu odtworzenia informacji o położeniu wału. Sposób odtwarzania położenia (struktura obserwatora położenia) może być dowolny. W badaniach używałem działający z zadowalającą dokładnością dla tego zakresu prędkości, zmodyfikowany obserwator Luenbergera z korektą o charakterze proporcjonalno-całkującym (ten rodzaj obserwatora wykorzystywałem już we wcześniejszych pracach), odtwarzający siłę elektromotoryczną. Koncepcja została sprawdzona symulacyjnie oraz zweryfikowana w laboratorium w różnych warunkach zasilania oraz w różnych warunkach pracy. Działanie napędu zostało sprawdzone dla zasilania obniżonym napięciem poprzez dodatkowy transformator oraz dla zasilania pełnym napięciem - bezpośrednio i przez dławik. Wykazano, że napęd pracuje poprawnie zarówno nieobciążony, jak i obciążony, także w przypadku skokowych zmian obciążenia o wartości bliskiej obciążeniu znamionowemu. Struktura regulacji wykorzystuje model odniesienia, którym jest model (całego) napędu w układzie sterowania wektorowego prędkości, w którego skład wchodzi regulator prędkości, regulatory prądów w osiach dq układu współrzędnych wirującego synchronicznie z wirnikiem, silnik oraz czujniki położenia i prędkości. Oryginalnym rozwiązaniem jest wprowadzenie do toru sterowania „obrotnika”, którego zadaniem jest obrót wektora zadanego napięcia (generowanego przez model odniesienia) o kąt korekcyjny $\Delta\Theta$, którego wartość jest wyznaczana w układzie korekcji prądu odtworzonego \hat{i}_d (to jest układ

korekcji, a nie układ regulacji, ponieważ prąd ten regulowany jest przez regulator umiejscowiony w modelu odniesienia). Po takiej modyfikacji, wektor napięcia zadany jest już na wejściu przekształtnika. Istota działania obrotownika polega na założeniu, że dla strategii sterowania ze stałym kątem mocy równym $\pi/2$ (czyli dla $i_{d\text{zad}} = 0$), jeżeli założymy poprawną pracę obserwatora położenia, to niezerowa wartość prądu \hat{i}_d oznacza błędną pozycję wektora (zadanego) napięcia i należy ją skorygować. Należy zwrócić uwagę na to, że obrotownik nie jest blokiem transformacji układów współrzędnych – służy tylko do modyfikacji pozycji (kąta) wektora napięcia. Kolejną ważną cechą zaproponowanego schematu sterowania jest znaczenie wartości korekcji prędkości (wartości poprawki), pobieranej z wejścia korektora prądu i_d (moduł 14, rys. 1). Nie jest to prędkość odtwarzana (estymowana), co może być sugerowane przez znak „minus” sumatora z wejściem prędkości zadanej ω_{ref} . Jest to wartość korekcji, o jaką należy zmienić wartość zadaną prędkości podawanej na wejście (prędkości zadanej $\omega_{\text{ref}2}$) modelu odniesienia. Jej wartość bezpośrednio wynika z szybkości (i znaku) zmian kąta korekcyjnego $\Delta\Theta$. Model odniesienia objęty jest dodatkowo sprzężeniem korygującym, który poprawia śledzenie (przez model silnika) punktu pracy silnika rzeczywistego poprzez odtwarzanie momentu obciążenia silnika (rzeczywistego). Wielkość wyjściowa estymatora obciążenia, realizowanego w postaci struktury proporcjonalno-całkującej, ustala się na wartości odpowiadającej obciążeniu silnika (rzeczywistego), dla równych wartości prądów – odtwarzanego \hat{i}_q oraz „mierzonych” prądu modelu odniesienia $i_{q\text{-ref}}$. Układ sterowania obliczany jest z krokiem $100 \mu\text{s}$, który odpowiada częstotliwości PWM falownika – 10 kHz. Cechą prezentowanego układu sterowania jest śledzenie przez model odniesienia punktu pracy obiektu rzeczywistego (silnika), a więc inaczej, niż w typowym układzie MFC (*Model Following Control*), gdzie w przypadku różnicy wielkości wyjściowych obiektu i jego modelu, na obiekt oddziałuje dodatkowo regulator korekcyjny.

Zaprezentowana koncepcja układu sterowania bezczujnikowego z PMSM dla zakresu niskiej prędkości nie było dotychczas prezentowane w publikacjach naukowych. W roku 2014 opisana powyżej struktura bezczujnikowej regulacji prędkości została **zgłoszona do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej**². W roku 2015 „Sprawozdanie o stanie techniki zgłoszenia...” wykazało dokumenty kategorii „A” – „dokument stanowiący znany stan techniki, ale niepodważający nowości i poziomu wynalazczego wynalazku”. Aktualnie zgłoszenie posiada status „oczekuje na badanie”.

ad. [10] Urbanski K., (2015), “Position Estimation at Zero Speed for PMSM Using Probabilistic Neural Network”, Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Cybernetics – CYBCONF 2015, Gdynia, Poland, 24-26 June 2015, USB stick, ISBN: 978-1-4799-8321-6, <http://dx.doi.org/10.1109/CYBCConf.2015.7175972>

W artykule zaprezentowano wyniki badań fizycznej metody wyznaczania położenia dla zatrzymanego wału lub dla prędkości bardzo niskiej, z wykorzystaniem sieci neuronowej probabilistycznej (PNN – *Probabilistic Neural Network*). Dla zatrzymanego wału, ze względu na

zerową wartość indukowanej SEM rotacji, stosuje się zazwyczaj metody fizyczne, które wykorzystują asymetrię magnetyczną maszyny. Użyta metoda identyfikacji położenia wału polega na wprowadzeniu dodatkowego pobudzenia napięciem testowym wysokiej częstotliwości i analizie odpowiedzi w postaci prądów wysokiej częstotliwości. Wprowadza się dodatkowe napięcie w osiach α i β (stacjonarnego układu współrzędnych skojarzonego ze stojanem) o równych amplitudach i częstotliwości, przesunięte względem siebie o kąt $\pi/2$. Hodograf tych napięć ma kształt okręgu. Analizowana jest odpowiedź układu – hodograf prądów wysokiej częstotliwości. Metody fizyczne są wykorzystywane do wyznaczania położenia wału PMSM głównie dla konstrukcji z magnesami umieszczonymi wewnątrz (IPMSM – *Interior mounted magnets...*), ze względu na wyraźną asymetrię, co ułatwia identyfikację położenia dzięki stosunkowo dużym zmianom permeancji w funkcji położenia wału. W pracy przedstawiono wyniki badań maszyny o magnesach umieszczonych powierzchniowo (SPMSM – *Surface mounted magnets...*), czyli w założeniu maszyny o stosunkowo niedużej asymetrii magnetycznej, co stanowi duże utrudnienie dla typowych metod bazujących na pomiarze indukcyjności. W rzeczywistości trudno uzyskać konstrukcję silnika o idealnej symetrii magnetycznej i to wykorzystuje ta metoda. Przy założeniu idealnej symetrii magnetycznej i pracy w zakresie liniowym, hodograf prądów byłby okręgiem, w rzeczywistości jest to kształt nieregularny, zbliżony do okręgu, nieco inny dla każdej pozycji wału (można to ocenić na podstawie wizualizacji 3D hodografu). Zastosowana koncepcja odtwarzania położenia wykorzystuje jedną z cech sztucznych sieci neuronowych – możliwość klasyfikacji. Pomimo pozornego braku powiązania kształtu hodografu z położeniem wału, sieć po treningu poprawnie klasyfikuje wzorce, także w przypadku dodania zakłóceń do analizowanych sygnałów. Wejściem badanej sieci był obraz hodografu prądów. Obraz ten składał się łącznie z 40 próbek pomiarowych prądu: 20 próbek w osi α i 20 w osi β . Podawany na wejście sieci sygnał był normalizowany. Wyjściem sieci było położenie wału. W pracy zaprezentowano wyniki badań z rozdzielczością ograniczoną do kilkunastu stopni (układ rozpoznawał 20 „sektorów”). W celu przeprowadzenia treningu sztucznej sieci neuronowej oraz przeprowadzenia symulacji działania sieci, zarejestrowano na stanowisku laboratoryjnym hodografy prądów i wyeksportowano je do środowiska symulacyjnego. Uzyskane wyniki zachęcają do dalszych badań przedstawionej koncepcji: sieć neuronowa nie tylko poprawnie klasyfikuje hodografy wzorcowe, ale i hodografy zaszumione (zakłócenia o poziomie 15% amplitudy prądu), a także hodografy wygenerowane poprzez interpolację (także z dodanymi zakłóceniami) dla położenia pomiędzy hodografami wzorcowymi. Jako klasyfikator została wykorzystana sieć neuronowa probabilistyczna. Podstawową jej zaletą z punktu widzenia badacza wykorzystującego PNN, jest jej ekstremalnie krótki czas treningu (w porównaniu np. do czasu uczenia sieci jednokierunkowej metodą propagacji wstecznej błędów). Umożliwia to efektywne badanie układów prototypowych. Cechą użytkową PNN wykorzystaną w badaniach jest wyższa dokładność klasyfikacji w porównaniu do np. perceptronów wielowarstwowych. W elektrotechnice, sieci tego typu zazwyczaj wykorzystywane są w diagnostyce, głównie maszyn, czy sieci przesyłowych, a także wykorzystuje się je w celu poprawy sterowania. Wykorzystanie PNN w sterowaniu bezczujnikowym, jako układu

odtworzącego położenia PMSM na zasadzie klasyfikacji obrazu, nie było dotychczas prezentowane w publikacjach naukowych.

ad. [4] Urbanski, K., Zawirski, K, (2015) „*Improved Method for Position Estimation Using a Two-Dimensional Scheduling Array.*” *Automatika – Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications* Vol. 56, Issue 3, pp. 331-340, ISSN: 0005-1144

Przeprowadzone wcześniej badania napędu bezczujnikowego z PMSM z użyciem zmodyfikowanego obserwatora Luenbergera odtwarzającego SEM wykazywały, że dla uzyskania poprawnej pracy dla pełnego zakresu prędkości i obciążeń, niezbędna jest modyfikacja parametrów obserwatora w funkcji prędkości i momentu silnika. Modyfikacja parametrów ma na celu zachowanie odpowiednio niskiej wartości błędu odtwarzania położenia wyznaczanego na podstawie SEM w stanie ustalonym oraz zapewnienie poprawnych przebiegów w stanach przejściowych napędu. Zazwyczaj *gain scheduling* wykorzystuje się w napędach z czujnikami i to zazwyczaj w funkcji jednej zmiennej. Innowacją jest zastosowanie modyfikacji parametrów dla układu bezczujnikowego w funkcji dwóch zmiennych. Założono, że układ wyznaczający wartości współczynników obserwatora ma je wyznaczać wykorzystując przygotowaną uprzednio tablicę dwuwymiarową, gdzie jednym z wejść będzie prędkość, a drugim moment silnika, oraz że odległość pomiędzy poszczególnymi punktami nie musi być stała. Dla wybranych par wejściowych $\{\hat{\omega}, |i_q|\}$ określających charakterystyczne punkty pracy (węzły) wyznaczono wartości współczynników obserwatora $\{P_0, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5\}$, posługując się opisanym w pracy algorytmem doboru parametrów. Został napisany program w języku C, umożliwiający płynną zmianę parametrów pomiędzy węzłami wykorzystujący metodę interpolacji biliniowej. Metoda interpolacji została wybrana ze względu na stosunkowo prosty zapis tego algorytmu w języku C, co umożliwia szybkie wykonanie obliczeń tak, aby zmieścić się z przeliczeniem całego algorytmu sterującego napędem w 100 μ s (czas ten związany jest z częstotliwością PWM przekształtnika wykorzystywanego na stanowisku laboratoryjnym). W celu zapobieżenia pobudzenia oscylacji w stanach przejściowych, sygnał prędkości dostarczany na wejście układu realizującego proces modyfikacji parametrów, poddawany jest działaniu filtra dolnoprzepustowego. Przeprowadzono analizę stabilności dla badanego zakresu zmian wybranych parametrów. W tym celu wyznaczono linie pierwiastkowe zlinearyzowanego modelu obserwatora. Działanie algorytmu *gain scheduling* zweryfikowano na stanowisku laboratoryjnym. Eksperyment potwierdził, że modyfikacja parametrów umożliwia zachowanie dużej dokładności odtwarzania położenia w zakładanym zakresie zmian punktu pracy napędu w stanie ustalonym, a ciągły charakter zmian parametrów w stanach przejściowych nie wpływa w sposób istotny na pobudzenie drgań w przebiegu prędkości. Badania wykazały, że zastosowanie algorytmu modyfikacji parametrów nie wpływa w istotny sposób na odporność układu sterowania na błędne oszacowanie parametrów silnika (w porównaniu do układu bez modyfikacji parametrów).

d) Podsumowanie

Badania, których wybrane wyniki zostały zaprezentowane w przedstawionych artykułach, dotyczyły zagadnień odtwarzania położenia oraz sterowania prędkością w układzie nie zawierającym czujnika położenia i prędkości, w napędach z SRM oraz PMSM. Poruszone w cyklu publikacji zagadnienia zawierały oryginalne i niespotykane w literaturze rozwiązania, w szczególności dla zakresu prędkości niskich, uważanych w literaturze za nieosiągalne przy użyciu obserwatora sił elektromotorycznych. Opracowane zostały modele symulacyjne, a znaczna część prezentowanych rozwiązań została zaimplementowana w mikroprocesorowym układzie sterującym napędem i zweryfikowana laboratoryjnie. Koncepty sterowania bezczujnikowego, które uznałem za szczególnie nowatorskie lub istotne dla zagadnień napędu elektrycznego, zostały zgłoszone jako wnioski patentowe do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej. Możliwość przedstawienia tych rozwiązań na renomowanych, międzynarodowych konferencjach naukowych oraz w recenzowanych czasopismach, a także aktualny status wszystkich trzech przedstawionych zgłoszeń patentowych („dokument stanowiący znany stan techniki, ale niepodważający nowości i poziomu wynalazczego wynalazku”) potwierdza, że rozwiązania prezentowane w wymienionych publikacjach prezentują oryginalne sposoby realizacji sterowania bezczujnikowego.

Do najważniejszych, uzyskanych w głównym nurcie badań naukowych, stanowiących mój wkład w rozwój metod sterowania bezczujnikowego silników elektrycznych, zaliczam:

- Opracowanie metody odtwarzania położenia wału SRM "z błędem globalnym prądu" [7]
- Opracowanie metody odtwarzania położenia wału SRM z obserwatorem typu MRAS [2]
(*zgłoszenie patentowe*)
- Opracowanie systemu modyfikacji parametrów obserwatora w zależności od punktu pracy (*gain scheduling* 2D) [4]
- Opracowanie metody odtwarzania położenia wału PMSM zasilanego poprzez dławik silnikowy lub filtr sinusoidalny [5][8] (*zgłoszenie patentowe*)
- Opracowanie nowej struktury sterowania bezczujnikowego PMSM , która umożliwiała pracę w szerokim zakresie obciążeń, także w zakresie niskiej prędkości [11]
(*zgłoszenie patentowe*)

W ramach prac związanych z prezentowaną tematyką opracowałem modele silników, napędów i układów sterowania oraz koncepcje układów odtwarzających położenie i prędkość wału silnika. Opracowałem koncepcje działania i napisałem skrypty umożliwiające wymianę danych pomiędzy modelami symulacyjnymi a laboratoryjnym układem sterowania. Uruchomiłem metodę szybkiego prototypowania algorytmów sterujących dla środowiska badawczego i środowiska programowania układu mikroprocesorowego. Zaprojektowałem i uruchomiłem moduł laboratoryjnego filtra silnikowego, służącego do badania napędu z silnikiem zasilanym poprzez dławik silnikowy lub filtr

sinusoidalny. Wykorzystywane w badaniach struktury układów odtwarzających położenie dla prędkości niskich i średnich zbudowane były z użyciem prostego i zmodyfikowanego obserwatora Luenbergera. Dla zatrzymanego wału położenie było odtwarzane za pomocą sztucznej sieci neuronowej probabilistycznej.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Poza tematyką opisaną w poprzednim punkcie, w obszarze moich zainteresowań znajdowały się zagadnienia związane z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych w zakresie sterowania napędami elektrycznymi. Jeszcze przed uzyskaniem stopnia doktora opracowałem regulator prędkości (przeprowadzono testy dla silnika prądu stałego, a następnie dla PMSM) na bazie sztucznej sieci neuronowej (SSN), który był odporny na zmiany momentu bezwładności obciążenia. Cechą szczególną tego rozwiązania była możliwość uzyskania takich czasów regulacji w całym zakresie zmian momentu bezwładności (także zmian o charakterze ciągłym), jakie byłyby możliwe do uzyskania w realizacji za pomocą regulatora dobranego do każdego momentu bezwładności indywidualnie. Zostało to udokumentowane m.in. w sprawozdaniu z grantu badawczego KBN⁴. Po uzyskaniu stopnia doktora kontynuowałem badania zmierzające do wykorzystania SSN w torze sterowania silników elektrycznych. Ich wynikiem były publikacje, w których dzieliłem się doświadczeniami dotyczącymi m.in. sposobów odtwarzania za pomocą SSN liniowych obiektów podstawowych automatyki⁵, modelowania obiektów nieliniowych, estymacji nieznanymi parametrów, czy też wykorzystania SSN jako regulatora prędkości w napędzie ze sprężystością⁶. Kolejnym zagadnieniem naukowym, którym się zajmowałem, było zasilanie PMSM z przekształtnika matrycowego⁷ (MC – matrix converter). Niezależnie od cech charakteryzujących przekształtnik matrycowy w kontekście jego oddziaływania na sieć, zajęliśmy się m.in. właściwościami silnika przy zasilaniu z MC w zakresie niskich prędkości. Przeprowadzono badania symulacyjne, które polegały m.in. na porównaniu pracy napędu dla zasilania z MC oraz zasilania z VSI (voltage source inverter). Modele napędu i przekształtników opracowane zostały z użyciem biblioteki SimPowerSystems w środowisku Matlab/Simulink. Wyniki symulacji wskazują na większą precyzję układu regulacji prądu w zakresie niskiej prędkości dla przypadku zasilania z przekształtnika matrycowego, co jest szczególnie istotne w kontekście sterowania bezczujnikowego w tym zakresie prędkości. Mając na uwadze możliwość późniejszego wykorzystania MC w układzie sterowania bezczujnikowego, wyniki zachęcają do kontynuowania badań w tym zakresie.

⁴ grant KBN: „Odporne sterowanie silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych”, 2000-2001, kierownik projektu.

⁵ Urbański K., „Modelowanie obiektów za pomocą sztucznych sieci neuronowych”, X Konferencja „Zastosowania komputerów w elektrotechnice”, Poznań, 18-20.04.2005, str. 33-34

⁶ grant MNiSW: „Sterowanie dla napędu z połączeniem sprężystym”, 2005-2007, wykonawca

⁷ Szczesniak P., Urbanski K., Fedyczak Z., Zawirski K., „Comparative study of drive systems using vector controlled PMSM fed by a matrix converter and a conventional frequency converter”, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, ISSN: 1300-0632, czasopismo z listy filadelfijskiej, artykuł zatwierdzony do publikacji

Zakończenie

Zaprezentowanym osiągnięciem naukowym jest cykl 11 powiązanych tematycznie publikacji, w tym 8 samodzielnych. Wyniki badań dotyczące ww. tematyki zostały opublikowane po uzyskaniu stopnia doktora w 33 pracach (łącznie z trzema zgłoszeniami patentowymi), w tym w 25 samodzielnych. W moim dorobku, związanym z prezentowanym cyklem publikacji, znajdują się cztery artykuły, w tym dwa samodzielne, w czasopismach z listy filadelfijskiej. Uwzględniając, że obszar zainteresowań obejmuje cały okres badań, a także zaawansowane metody sterowania napędami, wyniki tych badań zostały łącznie opublikowane w 63 artykułach, w tym 27 samodzielnych, a w moim dorobku znajduje się 7 artykułów z listy filadelfijskiej.

Publikacje ukazały się w materiałach renomowanych konferencji z recenzowanymi artykułami, takich jak European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Power Electronics & Motion Control Conference (PEMC), Electrical Drives and Power Electronics (EDPE), International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits (EPNC), Mechatronika, Modelowanie i Symulacja (MiS), Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym (SENE), Computer Applications in Electrical Engineering (ZKwE).

Baza **Web of Science** Core Collection (WoS) indeksuje 11 publikacji, które są cytowane 21 razy (w tym 15 cytowań obcych). **Indeks H jest równy 3**. Cytowania zamieszczone są w 19 artykułach, których wykaz załączono. Dodatkowo jest cytowanych 14 publikacji nieindeksowanych w bazie WoS.

Łącznie więc 25 publikacji widocznych w bazie **WoS cytowanych jest 42 razy**.

Baza **Scopus** indeksuje 18 publikacji, które są cytowane 45 razy. Wyznaczony **indeks H jest równy 4**. Cytowania zamieszczone są w artykułach, których wykaz załączono. W bazie Scopus 48 razy jest cytowanych 39 publikacji nieindeksowanych w bazie.

Łącznie więc 49 publikacji widocznych w bazie **Scopus cytowanych jest 93 razy**.

Moja aktywność w środowisku naukowym przejawia się m.in. poprzez aktywny udział w międzynarodowych konferencjach naukowych oraz znaczących konferencjach krajowych. Od roku 2005 jestem członkiem Polskiego Towarzystwa Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej (PTETiS). Uczestniczyłem także w pracach organizacyjnych związanych z promocją wiedzy: brałem udział w pracach komitetu organizacyjnego sympozjum ENID 2004 oraz w pracach komitetu organizacyjnego międzynarodowej konferencji naukowej EPE-PEMC 2008. Jestem zapraszany do napisania recenzji artykułów naukowych, m.in. dla czasopism IEEE, międzynarodowych konferencji IEEE oraz czasopism krajowych (kompletna lista umieszczona jest w Załączniku nr 3, pkt. III P). Byłem zaproszony do kierowania sesją „Power Electronics” na międzynarodowej konferencji Mechatronika (konferencja IEEE). Brałem udział łącznie w 7 grantach badawczych – jako kierownik grantu lub jako wykonawca, w tym aktywnie uczestniczyłem w realizacji dużego projektu współfinansowanego przez Unię Europejską pt. „Nowa generacja energooszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa/ Zadanie 9: Opracowanie projektów układów sterujących”. Poza

działalnością naukową prowadzę aktywnie działalność popularyzatorską i dydaktyczną. Byłem promotorem ponad 100 obronionych prac dyplomowych. Jestem autorem lub współautorem publikacji o charakterze popularyzatorskim⁸ oraz popularno-naukowym⁹.

.....Konrad Urbański.....

Konrad Urbański

⁸ Urbański K., (2007), „Wykorzystanie systemów przetwarzania danych w dydaktyce”, Proc. of the XII Scientific Conference Computer Applications in Electrical Engineering ZKwE'2007, Poznań

⁹ Urbanski K., (2012), “Position Estimation of the PMSM High Dynamic Drive at Low Speed Range,” Rozdział w monografii MATLAB - A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications - Volume 1, V. Katsikis, Ed. InTech, 2012, pp. 195-218, ISBN 978-953-51-0750-7, DOI: 10.5772/48750, **ponad 12 tys. pobrań wersji elektronicznej**