Bartłomiej Ufnalski
Imię i nazwisko wnioskodawcy

Warszawa, 10.03.2016

Autoreferat habilitacyjny

1. Imię i nazwisko

Bartłomiej Aleksander Ufnalski

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

- Dyplom magistra inżyniera (z wyróżnieniem), Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej, specjalizacja Automatyka i Inżynieria Komputerowa, tytuł pracy: "Neuronowy symulator silnika AC odtwarzający wektor strumienia stojana oraz moment i prędkość", 1999, promotor: prof. dr hab. inż. Lech M. Grzesiak.
- Stopień doktora nauk technicznych, w dziedzinie Elektrotechnika, Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej, 2005, tytuł rozprawy: "Zastosowanie sieci neuronowych do odtwarzania prędkości kątowej wirnika oraz strumienia stojana w układzie napędowym z silnikiem klatkowym", promotor: prof. dr hab. inż. Lech M. Grzesiak, doktorat z wyróżnieniem.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- 01.01.2005–01.08.2005 – zatrudnienie na stanowisku asystenta, Wydział Elektryczny, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Politechnika Warszawska.
- 01.08.2005–obecnie – zatrudnienie na stanowisku adiunkta, Wydział Elektryczny, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Politechnika Warszawska.

4. Wskazanie osiągnięcia naukowego, uzyskanego po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiącego istotny wkład w rozwój dyscypliny automatyka i robotyka zgodnie 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.)

4.1. Tytuł cyklu publikacji powiązanych tematycznie:

"Wykorzystanie metod inteligencji obliczeniowej
w automatyce napędu i energoelektronice
ze szczególnym uwzględnieniem
sterowania procesami powtarzalnymi"

4.2. Wykaz prac naukowych zaliczonych do cyklu:

I. Bartłomiej Ufnalski (**55%**), Arkadiusz Kaszewski (35%), Lech M. Grzesiak (10%), "Particle swarm optimization of the multioscillatory LQR for a three-phase four-wire voltage-source inverter with an *LC* output filter", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS 62(1), pp. 484–493, 2015, DOI: 10.1109/TIE.2014.2334669, **IF 6,498**
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaproponowaniu i opracowaniu metody optymalnego strojenia regulatora wielorezonansowego, stworzeniu oprogramowania wspierającego proces projektowania nastaw regulatora oraz przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na **55%**.*

II. Bartłomiej Ufnalski (**80%**), Lech M. Grzesiak (10%), Krzysztof Gałkowski (10%), "Particle swarm optimization of an iterative learning controller for the single-phase inverter with sinusoidal output voltage waveform", BULLETIN OF THE POLISH ACADEMY OF SCIENCES – TECHNICAL SCIENCES 61(3), pp. 649–660, 2013, DOI: 10.2478/bpasts-2013-0069, **IF 1,000**
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaproponowaniu i opracowaniu metody optymalnego strojenia regulatora repetycyjnego, stworzeniu oprogramowania wspierającego proces projektowania nastaw regulatora, opracowaniu modelu i wykonaniu badań numerycznych oraz przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na **80%**.*

III. Bartłomiej Ufnalski (**60%**), Lech M. Grzesiak (40%), "Particle swarm optimization of artificial-neural-network-based on-line trained speed controller for battery electric vehicle", BULLETIN OF THE POLISH ACADEMY OF SCIENCES – TECHNICAL SCIENCES 60(3), pp. 661–667, 2012, DOI: 10.2478/v10175-012-0059-9, **IF 0,980**
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaproponowaniu i opracowaniu metody optymalnego strojenia regulatora neuronowego, stworzeniu oprogramowania wspierającego proces projektowania nastaw regulatora, opracowaniu modelu i wykonaniu badań numerycznych oraz przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na **60%**.*

IV. Bartłomiej Ufnalski (**90%**), Lech M. Grzesiak (10%), "Artificial neural network based voltage controller for the single phase true sine wave inverter – a repetitive control approach", PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY 89(4), pp. 14–18, 2013, URL: pe.org.pl/articles/

2013/4/3.pdf
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaproponowaniu i opracowaniu oryginalnego neuroregulatora uwzględniającego powtarzalność procesu podlegającego sterowaniu, opracowaniu modelu przykładowego systemu z tym neuroregulatorem i wykonaniu badań numerycznych oraz przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na **90%**.*

V. Bartłomiej Ufnalski (**85%**), Lech M. Grzesiak (15%), "A plug-in direct particle swarm repetitive controller for a single-phase inverter", PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY 89(6), pp. 6–11, 2014, URL: pe.org.pl/articles/2014/6/2.pdf
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaproponowaniu i opracowaniu całkowicie nowatorskiego regulatora rojowego procesu powtarzalnego, opracowaniu modelu przykładowego systemu z tym regulatorem rojowym i wykonaniu badań numerycznych oraz przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na **85%**.*

VI. Bartłomiej Ufnalski (**85%**), Lech M. Grzesiak (15%), "Particle swarm optimization of an online trained repetitive neurocontroller for the sine-wave inverter", The 39th IECON annual conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 6001-6007, 2013, DOI: 10.1109/IECON.2013.6700120
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaproponowaniu i opracowaniu metody optymalnego strojenia neuroregulatora repetycyjnego, stworzeniu oprogramowania wspierającego proces jednoczesnego projektowania stopnia złożoności sieci i wybranych nastaw neuroregulatora, opracowaniu modelu i wykonaniu badań numerycznych oraz przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na **85%**.*

VII. Bartłomiej Ufnalski (**90%**), Lech M. Grzesiak (10%), "A performance study on synchronous and asynchronous update rules for a plug-in direct particle swarm repetitive controller", ARCHIVES OF ELECTRICAL ENGINEERING 63(4), pp. 635–646, 2014, DOI: 10.2478/aee-2014-0044
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaproponowaniu przejścia na asynchroniczną regułę aktualizacji cząstek w opracowanym regulatorze rojowym, opracowaniu modeli i wykonaniu badań numerycznych oraz przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na **90%**.*

VIII. Bartłomiej Ufnalski (**90%**), Lech M. Grzesiak (10%), "A comparative investigation on different randomness schemes in the particle-swarm-based repetitive controller for the sine-wave inverter", Advances in Intelligent Systems and Computing, 323, pp. 165–176, Springer 2014, ISSN 2194-5357, DOI: 10.1007/978-3-319-11310-4_15
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaproponowaniu przejścia na cykliczną listę liczb pseudolosowych w regule aktualizacji cząstek opracowanego regulatora rojowego, opracowaniu modeli i wykonaniu badań numerycznych oraz przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na **90%**.*

IX. Bartłomiej Ufnalski (**90%**), Lech M. Grzesiak (10%), "Repetitive neurocontroller with disturbance feedforward path active in the pass-to-pass direction for a VSI inverter with an output *LC* filter", BULLETIN OF THE POLISH ACADEMY OF SCIENCES – TECHNICAL SCIENCES 64(1), 2016, DOI: 10.1515/bpasts-2016-0013, **IF 0,914** (dla 2014)
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaproponowaniu rozszerzenia bazy sygnałów wejściowych neuroregulatora powtarzalnego o sygnał mierzalnego zakłócenia okresowego, opracowaniu algorytmu i wykonaniu badań numerycznych oraz przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na **90%**.*

X. Bartłomiej Ufnalski (**90%**), Lech M. Grzesiak (10%), "Plug-in direct particle swarm repetitive controller with a reduced dimensionality of a fitness landscape — a multi-swarm

Tab. 1. Analiza wskazanych pozycji jednolitego cyklu publikacji

Nr	Wkład wnioskodawcy	Impact Factor	Punktacja wg ministerialnego wykazu czasopism	Rok publikacji
I	55 %	6,498	50	2014
II	80 %	1,000	25	2013
III	60 %	0,980	30	2012
IV	90 %	nie dotyczy	10	2013
V	85 %	nie dotyczy	10	2014
VI	85 %	nie dotyczy	10	2013
VII	90 %	nie dotyczy	10	2014
VIII	90 %	nie dotyczy	10	2014
IX	90 %	0,914 (dla 2014)	20	2016
X	90 %	0,914 (dla 2014)	20	2015

approach", BULLETIN OF THE POLISH ACADEMY OF SCIENCES – TECHNICAL SCIENCES 63(4), pp. 857–866, 2015, DOI: 10.1515/bpasts-2015-0098, **IF 0,914** (dla 2014)
*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaproponowaniu podzielenia zadania sterowania procesem powtarzalnym pomiędzy kilka lub nawet kilkadziesiąt rojów w celu uproszczenia kształtu funkcji celu i zwiększenia szybkości zbieżności algorytmu, opracowaniu algorytmu i wykonaniu badań numerycznych oraz przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na **90%**.*

W Tab. 1 zebrano informacje dotyczące pozycji wskazanych w jednolitym cyklu publikacji. Sumaryczny współczynnik Impact Factor (zgodny z datą publikacji) jest równy 10,3, a z uwzględnieniem udziału procentowego 6,6. Sumaryczna liczba punktów (wg rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 27 października 2015 r. w sprawie kryteriów i trybu przyznawania kategorii naukowej jednostkom naukowym) jest równa 195, a z uwzględnieniem udziału procentowego jest równa 145,5.

Na podstawie opracowania Biblioteki Głównej PW z 25.01.2016, wskaźnik Hirscha (H-index) wnioskodawcy według bazy Web of Science lub Scopus jest równy 4. Sumaryczna liczba cytowań bez autocytowań według bazy Web of Science Core Collection to 46, natomiast według bazy Scopus to 81.

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

4.3.1. Motywacja i cel naukowy

Powtarzalność zadań sterowania jest cechą często pojawiającą się w automatyce przemysłowych procesów produkcyjnych i sterowaniu przekształtnikami energoelektronicznymi. Powtarzalny charakter zadania stwarza możliwości syntezy układów regulacji bazujących nie tylko na aktualnej wiedzy o stanie obiektu lub przewidywanym stanie obiektu (sterowanie predykcyjne), ale również w oparciu o stany układu z poprzednich powtórzeń (iteracji). Często stosowanym podejściem jest jednak pomijanie powtarzalności procesu i w efekcie synteza regulatorów, które nie uczą się z iteracji na iterację. Dzieje się tak, między innymi, z powodu bardziej złożonego procesu strojenia układów ze sterowaniem powtarzalnym, zarówno z lokalnym uczeniem iteracyjnym, jak i wielooscylacyjnych (wielorezonansowych), oraz problemami z odpornością

(krzepkością, *ang.* robustness) takich układów i ich stabilnością w długim horyzoncie liczby powtórzeń. W celu uczynienia tych układów praktycznymi, konieczne staje się stosowanie takich mechanizmów jak zapominanie lub tłumienie, co zostało zilustrowane w "Multiresonant versus Iterative Learning Control" opublikowanym na MATLAB Central. Wnioskodawca postawił sobie za zadanie opracowanie nowych metod sterowania procesami powtarzalnymi, ze szczególnym uwzględnieniem procesów powtarzalnych pojawiających się przy realizacji zadania kształtowania fali napięcia wyjściowego w falownikach z wyjściowym filtrem LC. Z drugiej jednak strony przyjęty obiekt regulacji stanowi często jedynie przykład pozwalający na zilustrowanie zasady działania opracowanych algorytmów. Zaproponowane metody nie ograniczają obszaru ich zastosowań do energoelektronicznych układów przekształtnikowych.

Zastane w 2011 roku przez wnioskodawcę algorytmy sterowania powtarzalnego bazowały w dużej mierze na jednym z dwóch podejść: regulatorach multioscylacyjnych (wielorezonansowych) lub regulatorach z uczeniem powtarzalnym (*ang.* iterative learning control(lers), ILC). Te ostatnie, w najbardziej klasycznym podejściu, zakładają wprowadzenie akcji całkującej w kierunku z iteracji na iterację (z pasa na pas). Obie grupy rozwiązań cechują istotne ograniczenia wynikające z braku efektywnych i w miarę uniwersalnych metod wyznaczania nastaw tych regulatorów oraz projektowania ewentualnych filtrów stabilizujących działanie układu w długim horyzoncie czasu. Problemy z doborem skutecznych (odpornych) nastaw regulatorów wielorezonansowych w sytuacji dużej liczby członów oscylacyjnych znane były wnioskodawcy przede wszystkim z uwagi na szereg prac eksperymentalnych i wdrożeniowych prowadzonych w macierzystym instytucie, a dotyczących zastosowania regulatorów wielorezonansowych w układach przekształtnikowych (m.in. w zespołach prof. dra hab. inż. Lecha M. Grzesiaka i dra hab. inż. Mariusza Malinowskiego, prof. PW). Z kolei praktyczne problemy z implementacją praw sterowania typu ILC w robotyce były znane wnioskodawcy z bezpośrednich kontaktów z prof. dr. hab. Krzysztofem Gałkowskim i członkami jego zespołów badawczych na Uniwersytecie Zielonogórskim oraz Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu. Dodatkowo, prace prowadzone w zespole wnioskodawcy nad opracowaniem odpornego regulatora napięcia wyjściowego przekształtnika typu CACF VSI (*ang.* constant-amplitude constant-frequency voltage-source inverter) bazującego na klasycznej regule ILC i dającego się efektywnie zastosować w warunkach rzeczywistych, pokazały istotne ograniczenia tego typu podejścia. Należy bowiem zwrócić uwagę na fakt często całkowicie różnych horyzontów liczby powtórzeń w robotyce i energoelektronice. Robot pracujący z częstotliwością np. 1 Hz i przezbrajany (resetowany) przykładowo dwa razy na dobę wykona niecałe 50 tysięcy powtórzeń, podczas gdy przekształtnik, którego zadaniem jest nieprzerwane wytwarzanie napięcia sinusoidalnego o częstotliwości 50 Hz np. przez tydzień musi wykonać ponad 30 milionów powtórzeń. Niestabilność związana z przeuczaniem się regulatora nie we wszystkich typach układów wymaga zatem stosowania algorytmów uodparniających – liczba wykonywanych iteracji może bowiem być na tyle mała, że problem przeuczania nie jest istotnie szkodliwy dla jakości regulacji w wymaganym horyzoncie czasu. Należy przy tym zaznaczyć, że problem braku odporności regulatora z akcją całkującą w kierunku z pasa na pas wynika z próby skonstruowania idealnego sygnału sterującego, tj. sprowadzającego uchyb regulacji do zera w każdym punkcie pasa, nawet jeżeli taki sygnał nie istnieje z uwagi na ograniczenia po stronie obiektu. Takim ograniczeniem jest w przypadku CACF VSI skończone napięcie obwodu pośredniczącego napięcia stałego, co dla intencjonalnie niezerowej indukcyjności filtru wyjściowego oznacza skończoną szybkość narastania prądu dławika i uniemożliwia pełne przeciwdziałanie zakłóceniu w postaci prądu obciążenia, gdy jego stromość przewyższy możliwą do uzyskania szybkość zmian prądu filtru LC.

Wnioskodawca wytyczył sobie w 2011 roku dwa, istotne jego zdaniem z uwagi na zastany stan stosowanych rozwiązań, cele naukowe:

- ◇ **opracowanie metody strojenia regulatorów multioscylacyjnych dla przekształtników typu CACF VSI zakładającej dobieranie metodą prób i błędów co naj-**

wyżej jednego współczynnika w całym procesie uzyskiwania oczekiwanej dynamiki układu zamkniętego;

- ◇ **opracowanie nowych regulatorów z uczeniem powtarzalnym, w których problemy niestabilności wynikające z próby skonstruowania nieistniejącego idealnego sygnału sterującego zostały wyeliminowane już na etapie koncepcji samego algorytmu uczenia, tj. bez potrzeby późniejszego uodparniania układu poprzez wprowadzanie dodatkowego filtrowania dolnoprzepustowego – filtrowania, co do którego nie ma pewności czy całkowicie stabilizuje system dla dowolnego kształtu okresowego zakłócenia, czy tylko odsuwa w czasie pojawienie się nieakceptowalnego poziomu przeuczenia regulatora.**

Na etapie formułowania tych celów wnioskodawca nie zakładał ograniczania się do określonego zbioru technik syntezy układów regulacji. Najbardziej obiecujące wyniki udało się jednak uzyskać stosując wybrane metody inteligencji obliczeniowej. Nie bez znaczenia pozostał z pewnością fakt, że wnioskodawca od lat porusza się w obszarze inteligencji obliczeniowej – początkowo wykorzystując ją do syntezy estymatorów zmiennych stanu w napędach elektrycznych (tematyka rozwijana głównie przed uzyskaniem stopnia doktora nauk technicznych), następnie do opracowywania regulatorów nie uwzględniających jawnie powtarzalności procesu (prace po uzyskaniu stopnia doktora) oraz przez ostatnie kilka lat prace skupiające się na zagadnieniach sterowania procesami powtarzalnymi.

Wyjaśnienia może wymagać przyjęta w autoreferacie nomenklatura. Należy pamiętać, że techniki RC (*ang.* repetitive control) i ILC (*ang.* iterative learning control) zostały pierwotnie opracowane przez różne zespoły przy odmiennych założeniach dotyczących stanu początkowego każdego pasa [30]. Obie jednak mogą być rozpatrywane jako przykłady zastosowania zasady modelu wewnętrznego (*ang.* internal model principle), jako że wykorzystują one człon repetycyjny jako uniwersalny generator dowolnego sygnału okresowego. Dodatkowo, szereg autorów (np. [6]) stosujących człony oscylacyjne (często określane też mianem rezonansowych) do budowy modelu wewnętrznego również określa te rozwiązania mianem *repetitive control*, co jest w pełni akceptowalnym nazewnictwem – pod względem zdolności do generowania określonego sygnału okresowego, człon multioscylacyjny może być rozważany jako przybliżenie uniwersalnego członu repetycyjnego. Należy przy tym zauważyć, że proponowane przez wnioskodawcę rozwiązania układów regulacji dla procesów powtarzalnych w sposób jawny bazują na iteracyjnym algorytmie uczenia sieci neuronowej lub roju cząstek. Mogłyby być zatem nazywane regulatorami z uczeniem iteracyjnym, pomimo zastosowania ich do ciągłego procesu powtarzalnego – dla kontrastu ILC pierwotnie zostało opracowane dla procesów wsadowych (*ang.* batch processes). Z uwagi na rozmywającą się granicę pomiędzy technikami RC i ILC, szczególnie w sytuacji realizacji zadania sterowania przy użyciu technik optymalizacji dynamicznej, wnioskodawca zdecydował się na stosowanie określenia regulator repetycyjny/powtarzalny w odniesieniu do dowolnego typu regulatora uwzględniającego na etapie jego projektowania powtarzalność procesu podlegającego regulacji. Oba zaproponowane algorytmy regulacji bazujące na optymalizacji dynamicznej mogą zostać wykorzystane zarówno do sterowania ciągłymi procesami powtarzalnymi jak i wsadowymi procesami powtarzalnymi. Pod tym względem stanowią zatem uniwersalne regulatory procesów powtarzalnych bazujące na iteracyjnych w swej naturze algorytmach optymalizacji dynamicznej.

4.3.2. Optymalne strojenie regulatorów przy użyciu metod populacyjnych w trybie *offline* – zadanie optymalizacji statycznej

Regulatory multi-oscylacyjne (wielorezonansowe) są obecnie coraz częściej stosowanym rozwiązaniem w energoelektronice. Strojenie tych regulatorów wciąż stanowi jednak istotne wyzwanie,

gdy liczba członów oscylacyjnych w danym torze regulacji jest większa niż jeden. Dla regulatora proporcjonalno-rezonansowego (PR) o liczbie członów oscylacyjnych większej niż jeden próba zastosowania metody wielomianu Naslina [22] prowadzi do powstania sprzecznego układu równań. Stosowna ilustracja dla przypadku dwóch oraz trzech członów oscylacyjnych dostępna jest w materiale dydaktycznym wnioskodawcy "Naslin polynomial method and multiresonant current controllers?". Niektórzy Autorzy (np. [5]) popełniają błąd pomijając równania, które wprowadzają tę sprzeczność. Błędem jest też stosowanie superpozycji regulatorów PR opisane w [5]. O ile człon rezonansowy cechuje duża selektywność w dziedzinie częstotliwości i niezależne projektowanie wzmocnień miałoby uzasadnienie, o tyle człon proporcjonalny nie posiada takiej selektywności i superpozycja niezależnie zaprojektowanych regulatorów PR może prowadzić nawet do utraty stabilności układu. Przegląd poprawnych z formalnego punktu widzenia metod strojenia wnioskodawca zawarł we wstępie do [I]. Efektywność tych metod mierzona jednoznacznością wpływu parametrów dobieranych przez projektanta metodą prób i błędów, np. elementów macierzy wag $\mathbf{Q}$ i $\mathbf{R}$ w metodzie LQR (*ang.* linear-quadratic regulator), na obserwowane właściwości dynamiczne znacząco maleje wraz ze wzrostem liczby członów oscylacyjnych. W praktycznych układach mających spełnić normy dotyczące zawartości harmonicznych w prądzie pobieranym z sieci zasilającej i/lub kształtu napięcia wyjściowego zastosowanie regulatorów wielorezonansowych wiąże się zazwyczaj z koniecznością wprowadzenia łącznie nawet więcej niż dziesięciu członów oscylacyjnych, co czyni proces ich strojenia w oparciu o metody klasyczne, w tym metodę prób i błędów, uciążliwym lub wręcz niepraktycznym. Wnioskodawca zaproponował zdefiniowanie wskaźnika jakości, nadrzędnego w stosunku do wskaźnika wykorzystywanego przez algorytm LQR, pozwalającego na zredukowanie wymiarowości przestrzeni decyzyjnej, tj. liczby parametrów dobieranych metodą prób i błędów, z typowych kilkunastu do pojedynczej zmiennej reprezentującej karę na dynamikę sygnału sterującego. Sam proces optymalizacji realizowany jest metodą roju cząstek. Jest to statyczne zadanie optymalizacyjne (*ang.* SOP, static optimization problem), co pozwala na wykorzystanie klasycznego algorytmu roju – bez potrzeby jego modyfikowania. Wnioskodawca opracował komplet skryptów pozwalających na strojenie tą metodą regulatorów wielorezonansowych dla falowników napięcia. Efektywność metody została potwierdzona eksperymentalnie [I].

Jednocześnie wnioskodawca dostrzega duży potencjał takiego podejścia nie tylko w odniesieniu do regulatorów typu LQR i nie tylko w przypadku falowników napięcia. Bezgradientowe strojenie ewolucyjne/populacyjne (np. przy użyciu metod typu rój cząstek, algorytm genetyczny, ewolucja różnicowa, czy symulowane wyżarzanie) układów regulacji w oparciu o zdefiniowany przez użytkownika wskaźnik jakości pozwala na istotne uproszczenie procesu projektowania poprzez zastąpienie często nieintuicyjnych zmiennych decyzyjnych jednym lub ewentualnie kilkoma współczynnikami wagowymi mającymi czytelny wpływ na zachowanie się układu. Podejście takie wnioskodawca wykorzystał do uproszczenia procesu strojenia m.in. również kaskadowego układu regulacji prędkości i położenia dla napędu z silnikiem BLDC [28], neuroregulatora prędkości pojazdu elektrycznego [III] oraz klasycznego regulatora ILC dla falownika napięcia [II]. Wnioskodawca z powodzeniem wykorzystał też rój cząstek do strojenia wybranych parametrów neuroregulatora prędkości kątowej silnika w napędzie z połączeniem sprężystym (w ramach współpracy z drem inż. Marcinem Kamińskim z Politechniki Wrocławskiej).

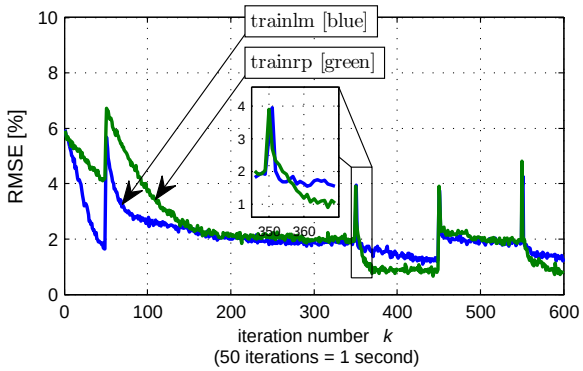
Zdaniem wnioskodawcy takie podejście do strojenia układów regulacji ma duży potencjał praktyczny – pozwala bowiem na optymalne strojenie regulatorów, dla których nie opracowano jeszcze skutecznych analitycznych reguł doboru nastaw. Dodatkowo, w procesie bezgradientowej optymalizacji układu regulacji stosunkowo łatwo daje się uwzględnić również aspekty topologiczne, na przykład takie jak liczba neuronów neuroregulatora czy rząd filtru stabilizującego w klasycznym ILC. Ilustracją może być tutaj jednoczesne strojenie wzmocnień i dobór liczby neuronów w warstwie ukrytej dla neuroregulatora procesu powtarzalnego [VI]. W ramch prac realizowanych przez doktorantów, którymi wnioskodawca opiekuje się naukowo, opracowywane

są obecnie układy wykorzystujące rój do strojenia multi-oscylacyjnego regulatora prądu trójfazowego przekształtnika sieciowego (zadanie typu SOP) oraz przestrajania regulatora prędkości w napędzie o zmiennych parametrach części mechanicznej (zadanie typu DOP, *ang.* dynamic optimization problem).

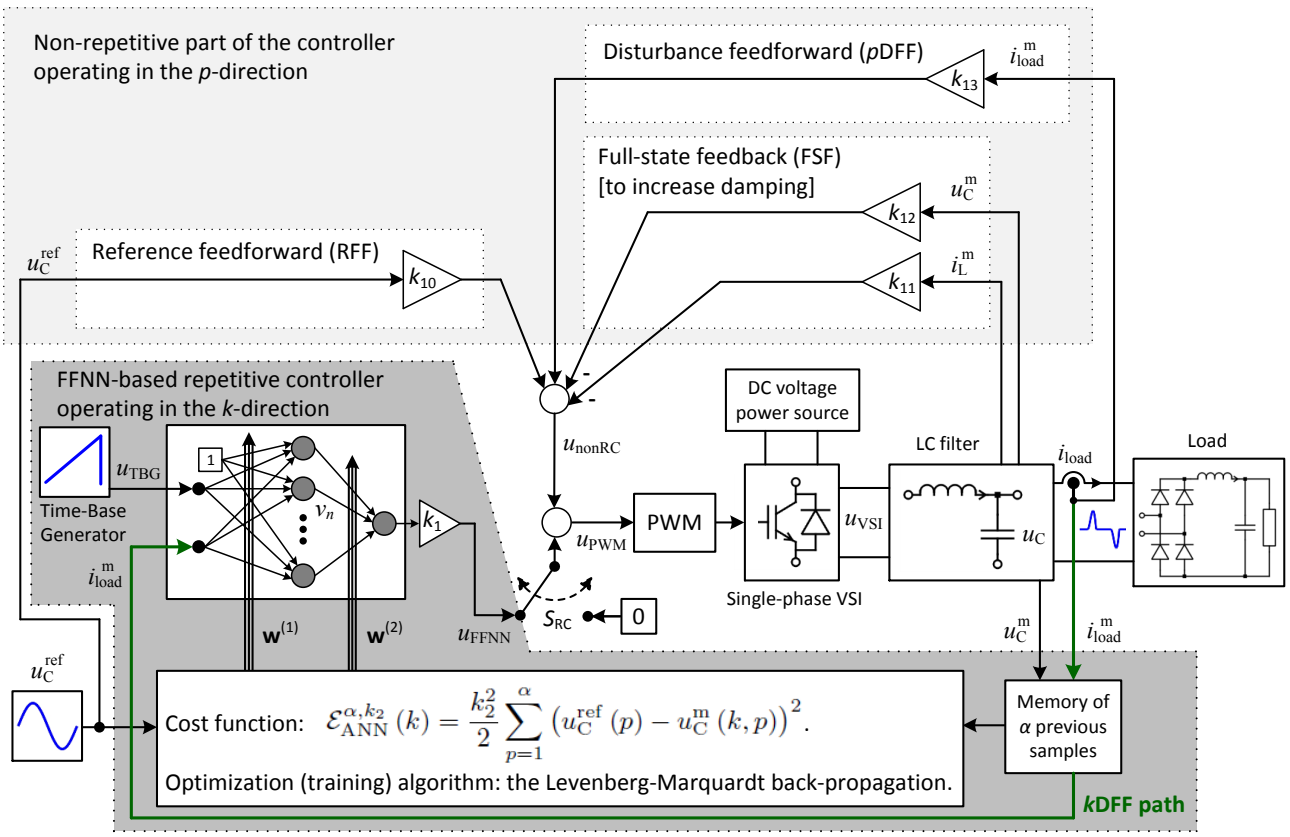
4.3.3. Neuroregulator procesu powtarzalnego

Szereg zespołów naukowych (np. zespół wnioskodawcy [8], zespół prof. dra hab. inż. Krzysztofa Zawirskiego [23], zespół prof. dr hab. inż. Teresy Orłowskiej-Kowalskiej [12] oraz zespół dra hab. inż. Krzysztofa Szabata, prof. PWr [13]) pokazało praktyczną możliwość zastosowania neuroregulatorów z procesem uczenia aktywnym podczas realizacji zadania sterowania, tj. uczonych w trybie *online*, w napędzie elektrycznym. Regulatory te projektowane były w sposób nie uwzględniający ewentualnej powtarzalności procesu sterowania. Należy przy tym podkreślić, że w zależności od typu użytej sieci neuronowej włączony proces uczenia może okazać się odpowiednikiem akcji całkującej w klasycznym regulatorze lub obserwatorze. Należy zatem zachować szczególną ostrożność przy formułowaniu wniosków o przewadze takich regulatorów (szczególnie, gdy bazują one na neuronach liniowych oraz wykorzystują gradientowe metody uczenia) nad klasycznymi regulatorami PI. W szeregu przypadków dyskusyjne jest też nazywanie ich adaptacyjnymi. Przykładowa równoważność rozwiązania neuronowego i całkowania w schemacie filtru dolnoprzepustowego została pokazana analitycznie przez wnioskodawcę na przykładzie neuronowego estymatora strumienia maszyny indukcyjnej [27]. Nie zmienia to jednak faktu, że nierepetycyjne neuroregulatory uczone w trybie *online* stwarzają możliwość łatwego wykorzystania dodatkowych (poza uchybem regulacji) sygnałów zawierających potencjalnie istotne z punktu widzenia regulowanego procesu informacje o stanie układu. Mogą to być, na przykład, informacje o pozostałych zmiennych stanu, tj. innych niż te podlegające bezpośredniej regulacji przy użyciu neuroregulatora [13], bądź historyczne próbki uchybu lub wielkości regulowanej. Nierepetycyjne neuroregulatory mogą zatem w wybranych sytuacjach stanowić uzasadnioną alternatywę dla regulatorów PI.

Pomimo sukcesu tych technik w odniesieniu do sterowania procesami bez uwzględniania ewentualnej ich powtarzalności, można było zaobserwować wyraźny brak badań dotyczących neuroregulatorów dla procesów powtarzalnych. W zasadzie poza oryginalnym opracowaniem [4], wykorzystującym koncepcję opisaną w [3] i pokazującym zastosowanie sieci B-splajnowej do realizacji zadania sterowania powtarzalnego układem UPS (*ang.* uninterruptible power supply), brak było prac istotnie rozwijających dziedzinę sieci neuronowych jako regulatorów procesów powtarzalnych. Należy przy tym zwrócić uwagę na fakt, że w [4] zastosowano lokalną regułę



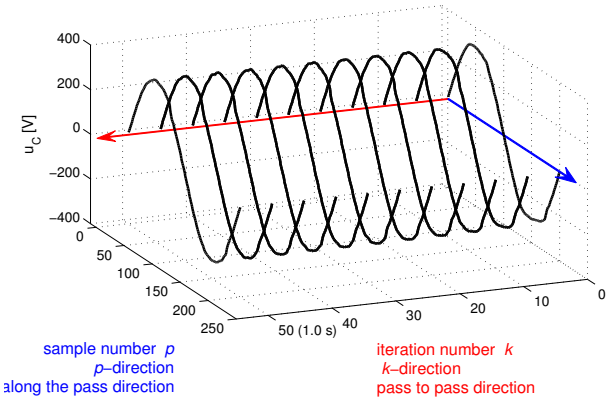
Rys. 1. Porównanie szybkości zbieżności neuroregulatora procesu powtarzalnego wykorzystującego odpowiednio metodę Levenberga–Marquardta lub Riedmillera-Brauna (RPROP) wstecznej propagacji błędu.



Rys. 2. Schemat blokowy układu z neuroregulatorem repetycyjnym o zbiorze sygnałów wejściowych rozszerzonym o sprzężenie w przód od zakłócenia [IX].

uczenia analogiczną do klasycznego prawa sterowania ILC (w wersji *wave* równoważnej dodaniu filtru FIR na sygnale uchybu regulacji). Takie lokalne reguły, tj. wykorzystujące informację o uchybie z poprzedniej iteracji tylko w otoczeniu punktu dla którego aktualizowane jest sterowanie, mają tendencję do przeuczania się i w konsekwencji mogą prowadzić do rozbieżności algorytmu sterowania repetycyjnego. Dotyczy to w podobnej mierze rozwiązań, w których obecna jest akcja całkująca w kierunku z pasa na pas w regule uczenia bezpośrednio aktualizującej próbkę sygnału sterującego oraz rozwiązań, w których całkowa reguła uczenia pośrednio aktualizuje sygnał sterujący poprzez, na przykład, zmianę współczynników splajnu. Zauważmy, że w klasycznym schemacie ILC próbujemy zapobiegać przeuczaniu się stosując filtrację dolnoprzepustową i/lub wykładniczo zapominając sygnał sterujący wypracowany w poprzedniej iteracji [29]. Podobnie w [4] zaobserwowano ten problem i do reguły uczącej dodano wykładnicze zapominanie wag sieci, aby zapobiec destabilizowaniu się systemu.

Natomiast rozwiązanie zaproponowane przez wnioskodawcę nie wymaga stosowania mechanizmu zapominania wag ani też dodatkowego filtrowania. Funkcja celu wykorzystywana przy uczeniu sieci neuronowej typu FFNN (*ang.* feedforward neural network) to uchyb średniokwadratowy obliczany za cały okres sygnału sterującego [IV]. Nie jest więc to reguła lokalna, lecz globalna, tj. biorąca pod uwagę zachowanie się systemu za cały pas. Przy odpowiednio dobranej liczbie neuronów oraz ograniczonych dopuszczalnych maksymalnych i minimalnych wartościach połączeń wagowych sieci, nie ma potrzeby wprowadzania współczynnika zapominania. Proces poszukiwania idealnego sygnału sterowania osiąga equilibrium nawet, jeżeli ograniczenia po stronie obiektu regulacji powodują, że taki sygnał nie istnieje. Dzieje się tak dzięki odpowiednio ograniczonym zdolnościom aproksymacyjnym sieci o właściwie dobranej liczbie neuronów i nasycających się wagach połączeń. W pracy [VI] pokazano jednoczesne dobieranie liczby neuronów oraz strojenie takiego regulatora przy użyciu roju cząstek i nieparametrycznego wskaźnika jakości, co istotnie upraszcza cały proces projektowania. W zasadzie jedyny istotny wybór do-

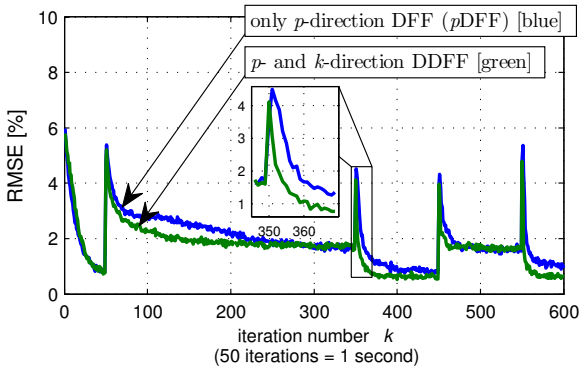


Rys. 3. Ewolucja napięcia wyjściowego po dołączeniu prostownika diodowego przy zastosowaniu części repetycyjnej rozszerzonej o sprzężenie w przód [IX].

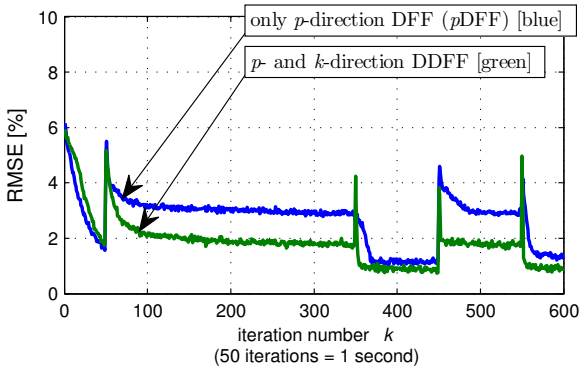
tyczy algorytmu uczenia. Tutaj przede wszystkim należy kierować się kompromisem pomiędzy szybkością zbieżności algorytmu a jego obliczeniochłonnością. Przykładowe porównanie szybkości zbieżności regulatora przy zastosowaniu odpowiednio metody Levenberga–Marquardta lub Riedmillera-Brauna (RPROP) wstecznej propagacji błędu, w warunkach opisanych w [IX] pokazano na Rys. 1.

Słabością początkowo zaproponowanego neuroregulatora były istotnie sprzeczne wymagania dotyczące liczby neuronów. Należy bowiem zauważyć, że kształt krzywej, którą ma zbudować sieć neuronowa, jest podobny do kształtu prądu obciążenia. Jeżeli wejściem sieci jest jedynie sygnał podstawy czasu (tak jak w [IV] i [4]), to dla obciążeń liniowych zadanie aproksymacyjne jest istotnie prostsze niż dla obciążeń silnie nieliniowych takich jak prostownik diodowy. Nie jest zatem możliwe zaproponowanie jednej określonej liczby neuronów, która nie będzie nadmiarowa dla obciążeń liniowych, a jednocześnie pozwoli uzyskać dobre wyniki przy niesinusoidalnych prądach obciążenia. Problem ten rozwiązano rozszerzając zbiór sygnałów wejściowych neuroregulatora repetycyjnego o sygnał prądu zakłócenia, którego dostępność założono już na etapie projektowania regulatora w kierunku wzdłuż pasa. Powstałą strukturę regulacji przedstawia Rys. 2. Opracowany neuroregulator repetycyjny zawiera zatem tor sprzężenia w przód od zakłócenia (okresowego w stanie ustalonym). Korzyści wynikające z dodania tego sprzężenia w obrębie części repetycyjnej omówiono w [IX]. Wnioskodawca nazwał to rozwiązanie DDFF (*ang.* disturbance dual feedforward) z uwagi na obecność sprzężenia w przód od zakłócenia w obu kierunkach. Przykładową ewolucję w dwóch wymiarach napięcia wyjściowego po obciążeniu układu prostownikiem diodowym pokazuje Rys. 3. Wzrost szybkości zbieżności po dodaniu sprzężenia w przód w obrębie części repetycyjnej pokazano na Rys. 4, a możliwość istotnego zmniejszenia liczby neuronów zilustrowano na Rys. 5. Dobór właściwej metody uczenia dla takiego neuroregulatora omówiono w [26], formułując przy tym rekomendowany zbiór algorytmów i ilustrując przykładowe konsekwencje zastosowania niewłaściwego algorytmu spośród uznanych algorytmów uczenia sieci neuronowych – algorytmów pierwotnie zaprojektowanych na potrzeby rozwiązywania statycznych problemów optymalizacyjnych.

Kompletny model numeryczny pokazujący zasadę działania opracowanego układu regulacji został opublikowany na MATLAB Central pod nazwą "Repetitive Neurocontroller with Disturbance Feedforward", natomiast model umożliwiający testowanie szeregu algorytmów uczenia – pod nazwą "Repetitive neurocontroller training algorithms". Należy podkreślić, że opracowany regulator jest typu *plug-in*, tj. po odpowiednim skonfigurowaniu może zostać dołączony jako regulator w kierunku z pasa na pas do dowolnego procesu powtarzalnego stabilnego wzdłuż pasa. Otrzymane wyniki pokazują możliwość formułowania zadań sterowania powtarzalnego jako zadań optymalizacji dynamicznej (dynamicznej z uwagi na możliwe zmiany charakteru



Rys. 4. Porównanie szybkości zbieżności układu bez i ze sprzężeniem w przód w części repetycyjnej – przypadek $N = 17$ neuronów [IX].



Rys. 5. Porównanie zdolności aproksymacyjnych układu bez i ze sprzężeniem w przód w części repetycyjnej – przypadek $N = 7$ neuronów [IX].

zakłócenia) rozwiązywanych iteracyjnie przy użyciu technik sieci neuronowych.

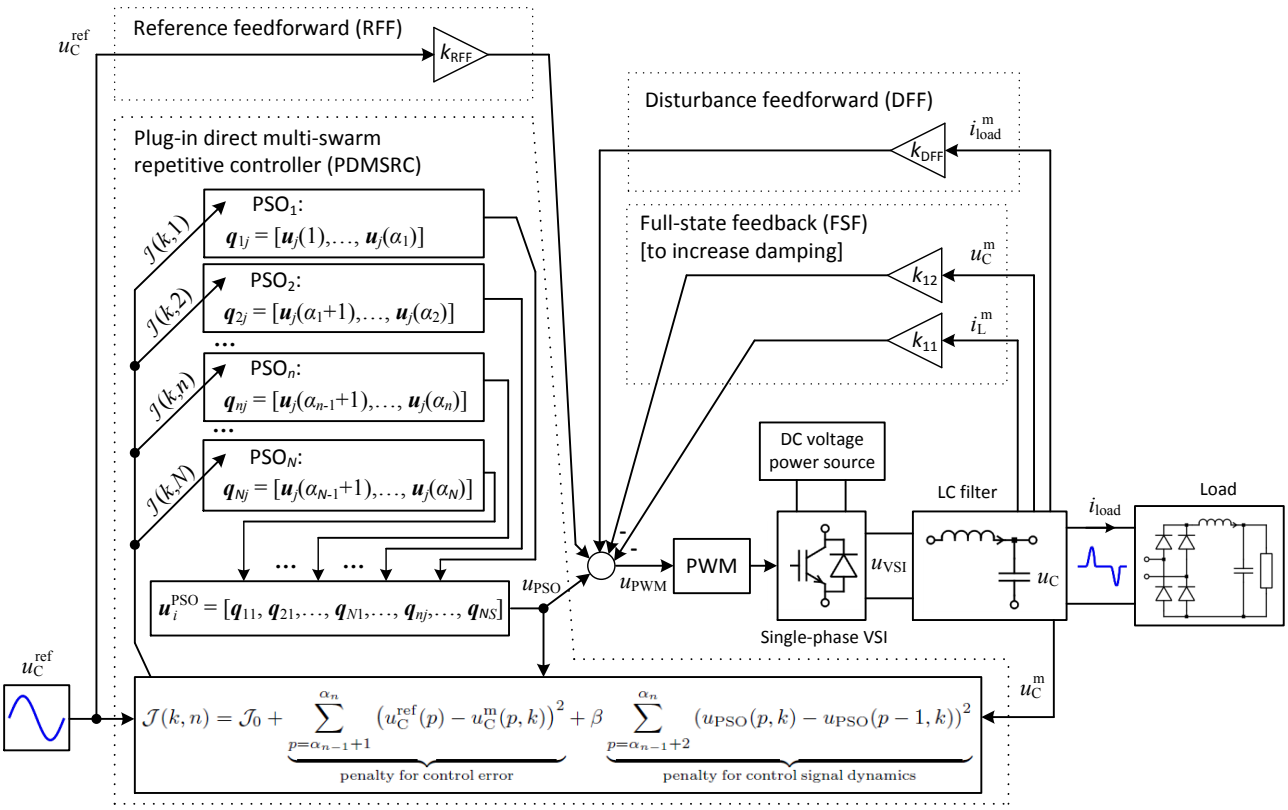
4.3.4. Bezpośredni regulator rojowy procesu powtarzalnego

Opracowany algorytm regulacji jest w pełni autorskim pomysłem i zgodnie z posiadaną przez wnioskodawcę wiedzą podobne rozwiązania nie były wcześniej opisywane w literaturze poświęconej sterowaniu procesami powtarzalnymi. Punktem wyjścia było zauważenie, że obiekt, w którym zachodzi proces powtarzalny, może pełnić rolę krytyka dla optymalizatora bazującego na populacji osobników i w konsekwencji wymagającego oceniania tych osobników w danej iteracji w warunkach w miarę zbliżonych. W każdym okresie sygnału zadanego można zatem ocenić jednego osobnika (lub kilku osobników, każdego należącego do odrębnego roju, jeżeli zadanie optymalizacyjne zostało podzielone pomiędzy kilka rojów), a po upływie liczby okresów równej liczbie osobników wykonać jedną pełną iterację algorytmu optymalizacyjnego. Podobnie jak w Sekcji 4.3.3, zadanie sterowania zostaje więc sformułowane w postaci zadania optymalizacji dynamicznej (DOP).

Znane są modyfikacje podstawowego algorytmu roju cząstek umożliwiające śledzenie poruszającego się optimum. Modyfikacje te jednak opracowywane były dla zadań optymalizacyjnych nie związanych z ciągłym procesem powtarzalnym. Należy zauważyć, że wykorzystanie obiektu regulacji (nie jego modelu) do oceniania cząstek bezpośrednio przechowujących próbki sygnału sterującego nakłada na algorytm jedno dodatkowe trudne do spełnienia w przypadku większości metod populacyjnych wymaganie – wszystkie rozwiązania proponowane przez osobników we wszystkich iteracjach muszą być akceptowalne z punktu widzenia jakości przebiegającego procesu regulacji. Wymaganie to istotnie ogranicza charakter możliwych do zastosowania tech-

nik ewolucji osobników. Na przykład, klasyczna mutacja w algorytmie genetycznym, czy też typowe ponowne losowanie położeń osobników po wykryciu zmiany kształtu funkcji celu, bądź ich specjalizacja w algorytmie rojowym, same w sobie wymagałyby istotnych modyfikacji w celu zapewnienia właściwego przebiegu procesu regulacji. Wnioskodawca przeanalizował szereg algorytmów ewolucyjnych oraz proponowanych do nich mechanizmów umożliwiających śledzenie zmiennego w czasie optimum, zarówno pod względem położenia, jak i jego wartości, pod kątem ich przydatności do sterowania falownikiem napięcia. W efekcie wybrany został rój cząstek, w którym wnioskodawca połączył dwie techniki pozwalające na efektywne reagowanie na zmianę kształtu prądu obciążenia, a mianowicie stopniowe zapominanie znalezionych rozwiązań oraz odpychanie od aktualnie najlepszych rozwiązań po przekroczeniu określonego dolnego progu rozproszenia (dywersyfikacji) roju. Początkowo powstał regulator jednorojowy o synchronicznej regule aktualizacji sygnału sterującego opisany w [V], a w wersji rozszerzonej o repetycyjne sprzężenie w przód od zakłócenia w [25]. Otrzymane wyniki stanowią numeryczny dowód możliwości zastosowania tej koncepcji do optymalnego kształtowania sygnału sterującego ciągłym procesem powtarzalnym, przy czym pojęcie *ciągły* odnosi się tutaj do braku możliwości resetowania warunków początkowych na starcie każdego pasa. Należy jednak zauważyć, że wypracowując kompromis pomiędzy dynamiką odpowiedzi części repetycyjnej a jakością napięcia w stanach przejściowych otrzymano bardzo długie czasy odpowiedzi na nagłą zmianę typu obciążenia. W efekcie badań nad poprawą szybkości zbieżności, przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej jakości napięcia w stanach przejściowych w kierunku z pasa na pas, zaproponowano zastąpienie pojedynczego roju zbiorem niezależnych rojów, tj. podzielenie 200-wymiarowego zadania optymalizacyjnego (10 kHz próbkowanie przy 50 Hz sygnale zadanym) na podzadania o mniejszej liczbie wymiarów. Pozwoliło to na uproszczenie kształtu funkcji celu dla poszczególnych rojów, co z kolei umożliwiło wprowadzenie szybszego zapominania potencjalnie nieaktualnych rozwiązań i w efekcie spowodowało znaczną poprawę szybkości śledzenia optimum zmieniającego się wskutek zmian kształtu prądu obciążenia. Otrzymany regulator wielorojowy przedstawiono na Rys. 6, a szczegółowo opisano w [X]. Dalszą poprawę dynamiki części repetycyjnej uzyskano poprzez zastąpienie synchronicznej reguły aktualizacji regułą asynchroniczną [VII], dla której stwierdzono możliwość obniżenia liczby cząstek, czyli w efekcie zwiększenia częstotliwości aktualizacji roju i przyspieszenia jego zbieżności do nowego optimum (Fig. 7). Ewolucję napięcia wyjściowego po dołączeniu prostownika diodowego pokazano na Rys. 8, a jakość tego napięcia w stanie ustalonym zilustrowano na Rys. 9.

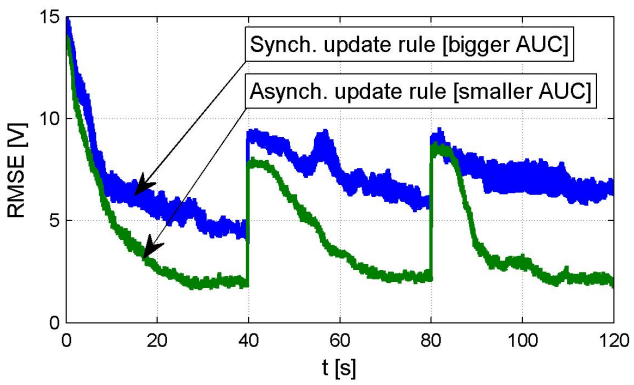
Badano też aspekt ograniczenia obliczeniochłonności algorytmu regulatora rojowego. Zaproponowano m.in. kontrolowanie rozproszenia roju na podstawie jego promienia w podprzestrzeni jednowymiarowej zamiast promienia w wielowymiarowej przestrzeni poszukiwań. Taka zmiana kontroli dywersyfikacji cząstek dodatkowo poprawiła zachowanie się roju, z uwagi na możliwość niezależnego wpływania na rozproszenie w każdym wymiarze, czyli dla każdej próbki w pasie. Zbadano również wpływ różnych metod wyznaczania dwóch zmiennych losowych obecnych w algorytmie roju cząstek [VIII]. Stwierdzono, że zastosowanie cyklicznie powtarzanej listy kilkunastu liczb pseudolosowych jest wystarczające dla zapewnienia prawidłowego funkcjonowania regulatora. Należy zauważyć, że oryginalnie PSO opracowane zostało jako algorytm stochastyczny (w praktyce pseudostochastyczny z uwagi na brak istotnej poprawy jego działania po zastosowaniu sprzętowego generatora liczb losowych), zakładający generowanie dwóch nowych liczb pseudolosowych w każdej iteracji, dla każdej cząstki, w każdym wymiarze. Efektywność opracowanego regulatora nie zmienia się jednak istotnie po przejściu na predefiniowaną odczytywaną cyklicznie listę kilkunastu liczb pseudolosowych, co dodatkowo upraszcza implementację. Pokazano również, że przy założeniu przełączania się pomiędzy trybem przyciągania i odpychania bazującym na promieniu wyznaczanym w przestrzeni jednowymiarowej, możliwe jest efektywne rozproszenie obliczeń rojowych w czasie, pozwalające na implementację regulatora przy użyciu np. mikrokontrolera klasy TMS320 C2000 [1]. Kluczowe dla takiej implementa-



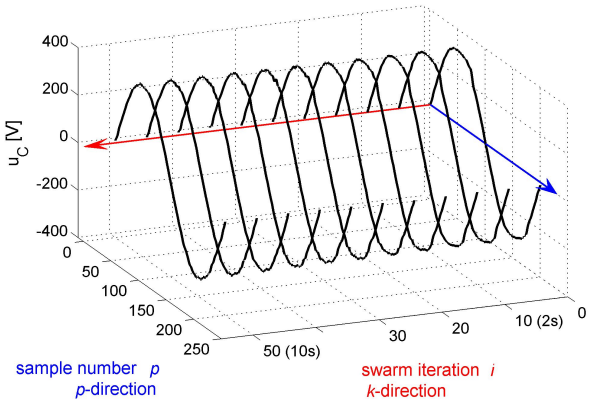
Rys. 6. Schemat blokowy wielorojowego regulatora repetycyjnego [X].

cji jest zauważenie, że zdecydowana większość obliczeń rojowych może zostać rozproszona na wszystkie okresy próbkowania przypadające na jeden okres sygnału zadanego. Na przykład, wartość funkcji celu można wyznaczać inkrementalnie, tak aby pełną jej wartością dysponować na koniec okresu sygnału zadanego. Z kolei fragmenty kodu związane z aktualizacją prędkości i położeń cząstek, wraz z niezbędnymi obliczeniami dotyczącymi wyparowywania wiedzy i kontroli rozproszenia roju, można zorganizować tak, aby w danym okresie próbkowania obliczenia dotyczyły tylko jednej cząstki i to tylko w jednym wymiarze przestrzeni poszukiwań. Badania eksperymentalne pokazały skuteczność zaproponowanego rozwiązania na przykładzie falownika napięcia sterowanego z użyciem mikrokontrolera TMS320F2812 [2]. Zilustrowano w ten sposób praktyczność algorytmu regulatora rojowego pod kątem mocy obliczeniowych oferowanych przez typowe mikrokontrolery stosowane w przemysłowych przekształtnikach energoelektronicznych. Jest to o tyle istotne, że zgodnie z wiedzą wnioskodawcy, nikt inny nie zademonstrował do tej pory rozwiązania regulatora procesu powtarzalnego wykorzystującego stochastyczny populacyjny algorytm optymalizacji realizowany w czasie rzeczywistym w połączeniu z globalną, tj. wyznaczaną dla całego pasa, swobodnie definiowalną przez użytkownika funkcją celu, wykorzystującą obiekt fizyczny jako krytyka, na potrzeby bezpośredniego kształtowania optymalnego sygnału sterującego przekształtnikiem energoelektronicznym.

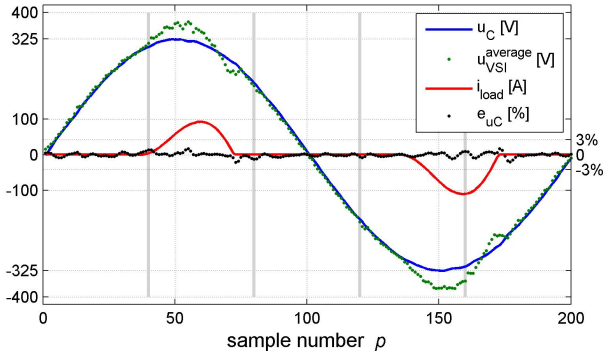
Podobnie jak w przypadku badań dotyczących neuroregulatora repetycyjnego, wykorzystany obiekt regulacji w postaci falownika o sinusoidalnym napięciu wyjściowym stanowi jedynie przykład, na którym wnioskodawca testował opracowywany algorytm repetycyjnego regulatora rojowego. Zweryfikowanie tej koncepcji również w odniesieniu do sterowania napędów elektrycznych oraz przekształtników sieciowych jest przedmiotem realizowanych aktualnie pod opieką wnioskodawcy prac doktorskich. Ponieważ regulator ten zakłada, że obiekt jest traktowany jak czarna skrzynka, istnieje potencjalna możliwość wykorzystania go do sterowania również procesami powtarzalnymi spotykanymi poza obszarem energoelektroniki czy robotyki. Należy podkreślić, że regulator ten nie jest obarczony problemem utraty stabilności w długim



Rys. 7. Porównanie zbieżności regulatora złożonego z 10 cząstek przy zastosowaniu synchronicznej (SUR) i asynchronicznej (ASUR) reguły aktualizacji roju [VII].



Rys. 8. Ewolucja napięcia wyjściowego przekształtnika z repetycyjnym regulatorem wielorojowym po obciążeniu układu prostownikiem diodowym [VII].



Rys. 9. Jakość napięcia wyjściowego przekształtnika z repetycyjnym regulatorem wielorojowym w stanie ustalonym pod obciążeniem nieliniowym [VII].

horyzoncie czasu. Użyta funkcja celu zawiera karę na dynamikę sygnału sterującego, co pozwala na osiągnięcie punktu równowagi związanego z kompromisem pomiędzy średniokwadratowym uchybem regulacji a średniokwadratowym przyrostem sygnału sterującego.

Kompletny model numeryczny pokazujący zasadę działania opracowanego układu regulacji został opublikowany na MATLAB Central pod nazwą "Plug-in Direct Particle Swarm Repetitive Controller". Ma to ułatwić potencjalnym zainteresowanym opanowanie tej techniki i zachęcić do jej stosowania nie tylko w przypadku sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi. Uniwersalność tego regulatora polega na jego bezgradientowości i wynikającej z tego

dużej swobodzie definiowania funkcji celu przez użytkownika – bez potrzeby ograniczania się do funkcji pozwalających na wymagane, z uwagi na implementację w czasie rzeczywistym, efektywne numerycznie wyznaczanie ich gradientu względem zmiennych decyzyjnych. W przypadku układów nierepetycyjnych uniwersalność tę posiadają wybrane rozwiązania z rodziny MPC (*ang.* model predictive control). Warto przy tym podkreślić silne przekonanie praktyków o przyszłości układów regulacji, w których zadanie sterowania formułowane jest jako rozwiązywane w trybie *online* zadanie optymalizacyjne [14, 15]. Proponowane rozwiązanie dobrze wpisuje się w te oczekiwania i stanowi jedyne znane wnioskodawcy tego typu rozwiązanie dla układów sterowania procesami powtarzalnymi.

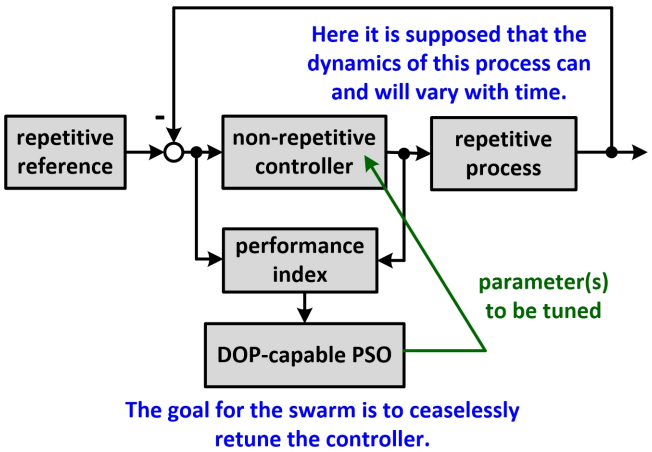
Aktualne prace wnioskodawcy skupiają się wokół rozwiązań hybrydowych, mających na celu połączenie szybkiej odpowiedzi klasycznych układów ILC z odpornością oferowaną przez algorytmy globalnej optymalizacji dynamicznej. Rozwijaną obecnie ideą jest częściowe porzucenie stochastycznej reguły ruchu roju i poruszanie wybranymi cząstkami deterministycznie. Wstępne obiecujące wyniki zostały już uzyskane dla przekształtnika sieciowego. Jest przygotowywany wniosek patentowy, a po jego zgłoszeniu planowane jest opublikowanie wyników badań m.in. w czasopismach Elsevier.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo–badawczych wnioskodawcy

5.1. B-splajnowy regulator repetycyjny

Wnioskodawca równolegle z opracowywaniem autorskich repetycyjnych regulatorów rojowych i neuronowych zajmował się też identyfikowaniem problemów związanych z implementacją proponowanych w literaturze praw sterowania powtarzalnego. W szczególności dokonał weryfikacji rozwiązań wykorzystujących B-splajny do generowania sygnału sterującego procesem powtarzalnym [3]. Wyniki przeprowadzonych w zespole wnioskodawcy badań eksperymentalnych sugerowały, że regulatory te są dużo mniej praktyczne w odniesieniu do sterowania napięciem wyjściowym falownika, niż mogłyby sugerować wyniki przedstawione w [4]. Jednocześnie wnioskodawca miał przeczucie, że problemy te wynikają z nie do końca właściwego użycia sieci B-splajnowej, natomiast sama koncepcja regulatora B-splajnowego może pozwolić na efektywne kształtowanie sygnału sterującego przy założeniu wprowadzenia kilku ulepszeń. Pierwszą zaproponowaną przez wnioskodawcę modyfikacją było wprowadzenie na wzór klasycznego regulatora ILC przesunięcia pomiędzy numerem próbki sygnału uchybu z poprzedniej iteracji a numerem próbki sygnału sterującego w aktualnej iteracji. Wnioskodawca zauważył też, że odpowiednio skonstruowanego programu dla mikrokontrolera nie będzie cechował wzrost obliczeniochłonności wraz ze wzrostem stopnia funkcji bazowej – pierwotna realizacja opisywana w [4] zdaniem jej Autorów nie była praktyczna dla splajnów wyższych rzędów, co ograniczało możliwą do uzyskania gładkość sygnału sterującego wzdłuż pasa. Dodatkowo, w wyniku badań inspirowanych i koordynowanych przez wnioskodawcę, wprowadzono trzecią modyfikację zapewniającą gładkość sygnału sterującego przy przechodzeniu z pasa na pas w stanie ustalonym. Badania eksperymentalne tak zmodyfikowanego regulatora B-splajnowego przedstawiono w [17]. Efektem prac było też zaobserwowanie pewnych analogii pomiędzy rozwiązaniem B-splajnowym i regulatorem ILC z filtrem Q, co z kolei zaowocowało alternatywną metodą syntezy takiego regulatora opisaną w [16]. Obserwacja ta stawia pod znakiem zapytania realne zalety rozwiązania B-splajnowego w stosunku do bardziej popularnego, klasycznego ILC wyposażonego w filtr Q. Jednoznaczne stwierdzenie równoważności obu rozwiązań pod względem możliwej do osiągnięcia jakości sterowania wymagałoby jednak bardziej ukierunkowanych badań.

Na uwagę zasługuje fakt, że po opublikowaniu modelu matematycznego układu z tak zmo-



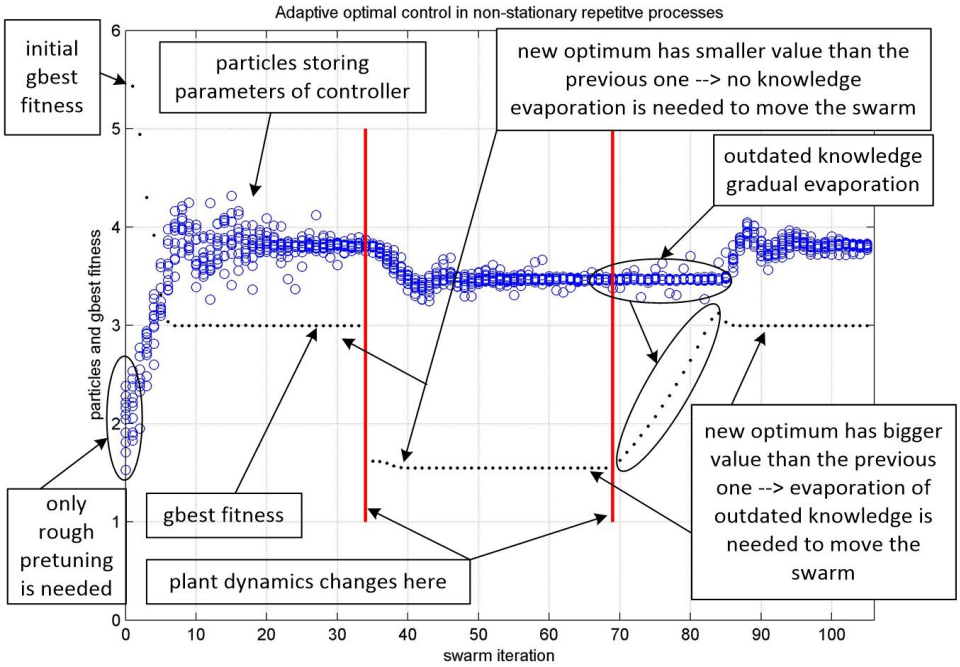
Rys. 10. Rój cząstek jako mechanizm adaptacji wzmocnień regulatora nierepetycyjnego sterującego procesem powtarzalnym o zmieniających się w czasie parametrach.

dyfikowanym regulatorem B-splajnowym na MATLAB Central pod nazwą "B-spline based repetitive neurocontroller" spotkał się on z uznaniem jednego z twórców koncepcji B-splajnowego regulatora powtarzalnego (patrz komentarz).

5.2. Bezgradientowa optymalizacja regulatora nierepetycyjnego w trybie *online* jako zadanie optymalizacji dynamicznej

Wciąż częstym podejściem przy syntezie układów regulacji dla procesów powtarzalnych jest pomijanie informacji o uchybie z poprzedniego pasa i implementowanie jedynie jednowymiarowego prawa sterowania. Zachodząca jednak nadal powtarzalność procesu może zostać wykorzystana do adaptacji wzmocnień(-nia) regulatora nierepetycyjnego, tak aby otrzymany układ regulacji działał optymalnie ze względu na zdefiniowany przez użytkownika wskaźnik jakości. Opracowany algorytm regulatora rojowego może zostać wykorzystany jako mechanizm zapewnienia tej optymalności, nawet przy zmieniających się w czasie parametrach regulowanego procesu. W takim zastosowaniu cząstki, zamiast być wektorami próbek sygnału sterującego, przechowują podlegające strojeniu nastawy regulatora nierepetycyjnego. Schemat ideowy takiego układu pokazano na Rys. 10. Pomysł ten został przetestowany na przykładzie regulatora proporcjonalnego i niestacjonarnego obiektu dwuinercyjnego. Otrzymane wyniki (Rys. 11) potwierdzają skuteczność takiego algorytmu.

Model numeryczny pokazujący zasadę działania opracowanej metody adaptacji nastaw regulatora realizującego zadanie sterowania procesem powtarzalnym wnioskodawca opublikował na MATLAB Central pod nazwą "Adaptive optimal control for repetitive processes". Opracowany przez wnioskodawcę algorytm adaptacji został pozytywnie zweryfikowany również w modelu układu napędowego oraz zaprogramowany w sterowniku PLC (*ang.* programmable logic controller), aby ułatwić zainteresowanym jego zastosowanie w środowiskach przemysłowych (patrz np. "PSO-tuned PI controller for speed control of the BLDC motor with variable inertia"). Wnioskodawca jest obecnie także opiekunem naukowym doktoranta, którego zadaniem będzie demonstracja działania tej metody na przykładzie regulatora PI prędkości w fizycznym napędzie elektrycznym o zmiennym momencie bezwładności.

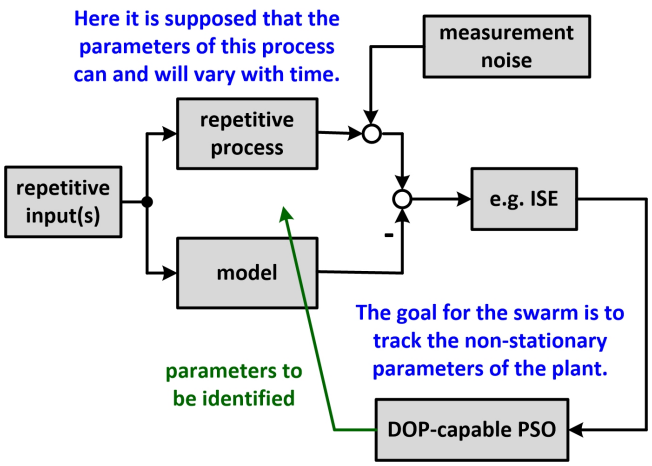


Rys. 11. Ilustracja przestrajania przez rój regulatora proporcjonalnego dla obiektu dwuinercyjnego, w którym jedna ze stałych czasowych podlega nagłym zmianom.

5.3. Bezgradientowa identyfikacja parametrów procesu powtarzalnego jako zadanie optymalizacji dynamicznej

Zadania obserwacji/estymacji zmiennych stanu i/lub parametrów obiektu są czasem rozwiązywane tymi samymi technikami co zadania regulacji. Przykładem może być tutaj regulator liniowo-kwadratowy (LQR) i obserwator Luenbergera ze wzmocnieniami zaprojektowanymi metodą LQR. Wnioskodawca postawił sobie zatem zadanie sprawdzenia możliwości wykorzystania algorytmu rojowego do śledzenia zmian parametrów obiektu regulowanego. W podejściu tym cząstka jest wektorem obserwowanych parametrów obiektu, a funkcja celu określa dopasowanie odpowiedzi modelu obiektu do odpowiedzi fizycznego obiektu. Schemat ideowy takiego układu pokazano na Rys. 12. Przykładowy wynik śledzenia trzech współczynników mianownika modelu drugiego rzędu przedstawiono na Rys. 13. Duże błędy identyfikacji na początku działania algorytmu wynikają z założenia jedynie bardzo zgrubnej wiedzy o wartościach parametrów podlegających procesowi identyfikacji. Należy przy tym zaznaczyć, że zadanie śledzenia parametrów jest mniej wymagające od zadania regulacji, przy założeniu zastosowania bezgradientowej metody populacyjnej. Żadna cząstka w rojach użytych w Sekcjach 4.3.4 i 5.2 nie może wyjść poza obszar rozwiązań akceptowalnych z punktu widzenia jakości realizowanego procesu. Natomiast w przypadku zadania identyfikacji to ograniczenie nie istnieje. Cząstki oceniane są przy użyciu modelu matematycznego, który iteracyjnie dopasowują do fizycznego obiektu. Nie każda cząstka musi zatem mieć bezpośredni wpływ na funkcjonowanie układu regulacji wykorzystującego zidentyfikowane wartości parametrów procesu. W części regulacyjnej, np. do przestrajania nastaw regulatora na podstawie nadążnie identyfikowanych parametrów obiektu, może zostać wykorzystane najlepsze rozwiązanie znalezione przez rój w każdej jego iteracji lub nawet co kilka iteracji.

Model ilustrujący zaproponowaną przez wnioskodawcę metodę identyfikacji zmieniających się parametrów procesu powtarzalnego został opublikowany na MATLAB Central pod nazwą "Gradient-free parameter identification in repetitive processes". Opublikowano też model "In-



Rys. 12. Rój cząstek jako mechanizm identyfikacji parametrów niestacjonarnego procesu powtarzalnego.

duction motor parameter estimation and tracking", który ilustruje wykorzystanie tej metody do nadążnej identyfikacji wybranych parametrów silnika indukcyjnego.

Łącznie pokazano w ten sposób możliwość wykorzystania bezgradientowego populacyjnego optymalizatora do realizacji trzech zadań w układach sterowania procesami powtarzalnymi:

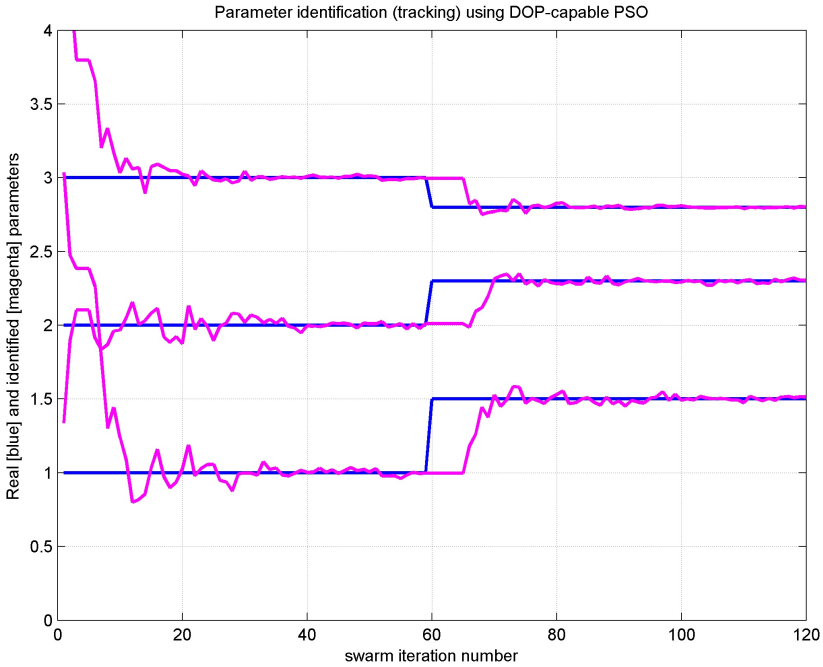
- ◇ bezpośredniego zadania regulacji repetycyjnej (Sekcja 4.3.4),
- ◇ optymalnej adaptacji regulatora nierepetycyjnego sterującego procesem powtarzalnym (Sekcja 5.2) oraz
- ◇ nadążnej identyfikacji parametrów niestacjonarnego procesu powtarzalnego (Sekcja 5.3),

co pokazuje duży potencjał metody roju cząstek, rozszerzonej o mechanizm zapominania i dywersyfikacji, w zastosowaniu do procesów powtarzalnych. Przedstawiony zbiór aplikacji nie wyczerpuje oczywiście potencjalnych obszarów zastosowania opracowanego algorytmu. Przykładowo, można sobie wyobrazić nadążną optymalizację współczynników filtru Q w klasycznym ILC w celu zapewnienia optymalności sygnału sterującego, nie tylko dla wybranego wstępnie założonego zbioru zakłóceń jak to zostało uczynione w [II].

5.4. Układy napędowe pojazdów elektrycznych

Już po uzyskaniu stopnia doktora wnioskodawca zajmował się tematyką napędów przekształtnikowych dla pojazdów elektrycznych. Prace te były prowadzone w wieloosobowych zespołach, a ich warstwa naukowo-badawcza była realizowana, w sporej mierze, przy współudziale doktorantów. Wnioskodawca był natomiast odpowiedzialny za opracowanie koncepcji układów, badania numeryczne (w tym termiczne), kierowanie zespołami badawczymi w obrębie macierzystego instytutu oraz redagowanie publikacji naukowych. Zdaniem wnioskodawcy na szczególną uwagę zasługują następujące efekty tych prac:

- ◇ opracowanie, skonstruowanie i uruchomienie stanowiskowych przekształtnikowych układów napędowych w skali 1:1 dla pojazdu hybrydowego (szeregowy układ z generatorem spalinowym i magazynem bateryjnym) oraz pojazdu elektrycznego [9, 11] – obu w wersji jednosilnikowej, tj. przeznaczonych do układów z dyferencjałem mechanicznym – dla Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej;



Rys. 13. Ilustracja śledzenia przez rój zmieniających się parametrów procesu powtarzalnego.

- ◇ opracowanie, skonstruowanie i uruchomienie stanowiskowego czterosilnikowego układu napędowego do badania dwusilnikowych napędów pojazdów z dyferencjałem elektronicznym, umożliwiającego m.in. modelowanie oporów ruchu, modelowanie charakterystyk baterii trakcyjnej oraz wspieranie systemu magazynem ultrakondensatorowym [10, 18, 20] – prace wykonane w ramach projektu "ECO-Mobilność" koordynowanego przez Wydział Transportu Politechniki Warszawskiej;

- ◇ opracowanie, skonstruowanie w skali 1:1 i uruchomienie na makiecie mobilnej preprototypowego układu napędowego o hybrydowym bateryjno-ultrakondensatorowym magazynie energii z rozmytym regulatorem rozdziału mocy [19, 21] – prace wykonane w ramach projektu "ECO-Mobilność" koordynowanego przez Wydział Transportu Politechniki Warszawskiej.

Należy przy tym podkreślić, że poza algorytmami sterowania i programami dla mikrokontrolerów, również wszystkie przekształtniki energoelektroniczne oraz towarzyszące im układy elektroniczne zostały zaprojektowane od podstaw w ramach prac wykonanych przez zespół. Stworzono w ten sposób elastyczną, otwartą pod względem oprogramowania platformę badawczą. Algorytmy sterowania układami napędowymi pojazdów elektrycznych, wykorzystujące techniki inteligencji obliczeniowej, są nadal rozwijane przez zespół, w którym obecnie wnioskodawca pełni rolę promotora pomocniczego i opiekuna naukowego.

5.5. Programowalny optymalny regulator stanu dla silnika indukcyjnego

Po uzyskaniu stopnia doktora wnioskodawca opracował układ sterowania dla silnika indukcyjnego, pozwalający na wykorzystanie metody LQR do optymalnego dobierania nastaw tego regulatora. W zadaniu tym macierz stanu opisująca dynamikę prądów i strumieni maszyny zależy od punktu pracy, determinowanego np. przez parę: prędkość kątowa wirowania wektora przestrzennego strumienia stojana i poślizg. W układzie regulacji zastosowano sieć neuronową

do przestrajania w locie wzmocnień regulatora wraz ze zmianą punktu pracy [7]. Analogiczny pomysł przestrajania regulatora stanu dla obiektu nieliniowego został potem wykorzystany przy realizacji serwonapędu z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych [24].

Model ilustrujący metodę przestrajanego siecią neuronową regulatora stanu został opublikowany na MATLAB Central pod nazwą "Programmable linear-quadratic regulator".

5.6. Opublikowane modele

Zdaniem wnioskodawcy na uwagę zasługuje fakt dużej popularności autorskich modeli opublikowanych na MATLAB Central ilustrujących m.in. rozwiązania będące przedmiotem niniejszego autoreferatu. Modele dotyczące sterowania powtarzalnego pobierane są średnio 250 razy miesięcznie, przy czym autor ocenia, że nie więcej niż 25% tych pobrań może pochodzić od jego studentów. Popularność 24 opublikowanych modeli, w tym 15 dotyczących zastosowania elementów inteligencji obliczeniowej w automatyce napędu i energoelektronice ze szczególnym uwzględnieniem sterowania procesami powtarzalnymi (9 modeli), plasuje wnioskodawcę począwszy od roku 2014 w gronie Top 5% contributor. Może to być sygnałem, że zaproponowane rozwiązania wykorzystujące narzędzia inteligencji obliczeniowej – szczególnie te z obszaru sterowania procesami powtarzalnymi przy użyciu technik optymalizacji dynamicznej – stanowią interesującą alternatywę dla niepozbawionych towarzyszących im problemów klasycznych schematów sterowania z uczeniem iteracyjnym (ILC).

Bibliografia

[1] P. Biernat, B. Ufnalski i L. M. Grzesiak: Direct particle swarm repetitive controller with time-distributed calculations for real-time implementation, *Proc. of the* 7th *International Conference on Intelligent Systems (IS)*, t. 322, Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, 2014, s. 499–508.

[2] P. Biernat, B. Ufnalski i L. M. Grzesiak: Real-time implementation of the multi-swarm repetitive control algorithm, *Proc. of the* 9th *International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE)*, 2015, s. 119–125.

[3] Y. Q. Chen, K. L. Moore i V. Bahl: Learning feedforward control using a dilated B-spline network: frequency domain analysis and design, *IEEE Transactions on Neural Networks*, t. 15, nr. 2, 2004, s. 355–366.

[4] H. Deng, R. Oruganti i D. Srinivasan: Neural controller for UPS inverters based on B-spline network, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, t. 55, nr. 2, 2008, s. 899–909.

[5] A. M. Dumitrescu, G. Griva, R. Bojoi, V. Bostan i R. Magureanu: Design of current controllers for active power filters using Naslin polynomial technique, *European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, 2007, s. 1–7.

[6] G. Escobar, A. A. Valdez, J. Leyva-Ramos i P. Mattavelli: Repetitive-based controller for a UPS inverter to compensate unbalance and harmonic distortion, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, t. 54, nr. 1, 2007, s. 504–510.

[7] L. M. Grzesiak i B. Ufnalski: Neural-Network-based Programmable State Feedback Controller for Induction Motor Drive, *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 2006, s. 1091–1097.

[8] L. M. Grzesiak, V. Meganck, J. Sobolewski i B. Ufnalski: On-line Trained Neural Speed Controller with Variable Weight Update Period for Direct-Torque-Controlled AC Drive, *12th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC)*, 2006, s. 1127–1132.

[9] L. M. Grzesiak, B. Ufnalski, A. Kaszewski, G. Gąbka i P. Roszczyk: Power management in series hybrid drive, *Electrical Review (Przegląd Elektrotechniczny)*, t. 88, nr. 4b, 2012, s. 304–308.

[10] L. M. Grzesiak, B. Ufnalski, A. Kaszewski, M. Michalczuk, P. Rumniak, A. Gałecki i P. Biernat: Przekształtnikowy układ napędowy dla miejskiego pojazdu elektrycznego z hybrydowym magazynem energii - emulator fizyczny oraz makieta mobilna, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, t. 98, nr. 1, 2013, s. 79–88.

[11] L. M. Grzesiak, B. Ufnalski, A. Kaszewski, G. Gąbka i P. Roszczyk: Series plug-in hybrid powertrain system – an experimental setup, *Electrical Review (Przegląd Elektrotechniczny)*, t. 88, nr. 4b, 2012, s. 300–303.

[12] M. Kaminski i T. Orlowska-Kowalska: FPGA implementation of ADALINE-based speed controller in a two-mass system, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, t. 9, nr. 3, 2013, s. 1301–1311.

[13] M. Kaminski, T. Orlowska-Kowalska i K. Szabat: Neural speed controller based on two state variables applied for a drive with elastic connection, *Proc. of the* 16th *International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC)*, 2014, s. 610–615.

[14] R. Kennel: *Predictive control – recent developments and results*, Distinguish Lecturer IEEE Power Electronics Society Seminar, Warsaw, 2015.

[15] R. Kennel: *Predictive control – the powerful method to control power converters and drives in the future*, Distinguish Lecturer IEEE Power Electronics Society Seminar, Warsaw, 2012.

[16] M. Malkowski, B. Ufnalski i L. M. Grzesiak: B-spline based repetitive controller for sine wave inverters – choosing the right blending functions, *Proc. of XII Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym (SENE)*, 2015, s. 1–6.

[17] M. Malkowski, B. Ufnalski i L. M. Grzesiak: B-spline based repetitive controller revisited: error shift, higher-order polynomials and smooth pass-to-pass transition, *Proc. of the* 19th *International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 2015, s. 19–25.

[18] M. Michalczuk, L. M. Grzesiak i B. Ufnalski: Hybridization of the lithium energy storage for an urban electric vehicle, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, t. 61, nr. 2, 2013, s. 325–333.

[19] M. Michalczuk, B. Ufnalski i L. M. Grzesiak: Fuzzy logic based power management strategy using topographic data for an electric vehicle with a battery-ultracapacitor energy storage, *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, t. 34, 2015, s. 173–188.

[20] M. Michalczuk, B. Ufnalski, L. M. Grzesiak i P. Rumniak: Power converter-based electrochemical battery emulator, *Electrical Review (Przegląd Elektrotechniczny)*, t. 90, nr. 7, 2014, s. 18–22.

[21] M. Michalczuk, P. Rumniak, P. Biernat, A. Gałecki, L. M. Grzesiak, B. Ufnalski i A. Kaszewski: System sterowania dla przekształtnikowego układu napędowego miejskiego pojazdu elektrycznego z hybrydowym magazynem energii, *Napędy i Sterowanie*, nr. 5, 2014, s. 121–130.

[22] P. Naslin: *Essentials of optimal control*, Iliffe, 1969.

[23] T. Pajchrowski, K. Zawirski i K. Nowopolski: A neural speed controller trained on-line by means of modified RPROP algorithm, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, t. 11, nr. 2, 2015, s. 560–568.

[24] T. Tarczewski: *Sterowanie serwonapędu z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych ze sprzężeniem od stanu i estymowanego momentu oporowego*, prac. dokt., Politechnika Warszawska, Polska, 2008.

[25] B. Ufnalski i L. M. Grzesiak: Feedback and feedforward repetitive control of single-phase UPS inverters – an online particle swarm optimization approach, *Scientific Reports of the Cologne University of Applied Sciences*, 1, 2014, s. 59–67.

[26] B. Ufnalski i L. M. Grzesiak: Repetitive neurocontroller with disturbance dual feedforward – choosing the right dynamic optimization algorithm, *Proc. of the* 17th *European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15–ECCE Europe)*, 2015, s. 1–10.

[27] B. Ufnalski i L. M. Grzesiak: Selected methods in flux estimation for induction motor drives, *Power electronics and electrical drives – selected problems*, wyed. T. Orłowska-Kowalska, Polish Academy of Sciences, Electrical Engineering Committee, 2007, s. 204–222.

[28] B. Ufnalski, L. M. Grzesiak i A. Kaszewski: Advanced and Intelligent Control in Power Electronics and Drives, Springer, 2014, rozd. Advanced control and optimization techniques in AC drives and DC/AC sine wave voltage inverters: selected problems, s. 303–333.

[29] M. H. A. Verwoerd: *Iterative learning control – a critical review*, prac. dokt., University of Twente, The Netherlands, 2005.

[30] Y. Wang, F. Gao i F. J. Doyle III: Survey on iterative learning control, repetitive control, and run-to-run control, *Journal of Process Control*, t. 19, nr. 10, 2009, s. 1589–1600.

.....

Podpis wnioskodawcy