



Politechnika Poznańska

Załącznik nr 3 – Autoreferat

Łukasz Knypiński

**Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki
Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej**

27 lipca 2023

1. Imię i nazwisko

Łukasz Knypiński

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

Stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Elektrotechnika.

Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny.

Rozprawa pt.: „*Optymalizacja silników o magnesach trwałych na podstawie polowo-obwodowego modelu zjawisk elektromagnetycznych*”.

Promotor pracy: prof. dr hab. inż. Lech Nowak.

Recenzenci pracy: prof. dr hab. inż. Marian Łukaniszyn oraz prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg.

Data nadania stopnia: 20.09.2016 rok.

Dyplom ukończenia studiów magisterskich.

Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny.

Kierunek Elektrotechnika, specjalność Maszyny elektryczne i układy wykonawcze automatyki.

Temat pracy: „*Projekt stanowiska do badania aktuatora o ruchu obrotowym*”.

Promotor pracy: dr inż. Krzysztof Kowalski.

Rok ukończenia studiów: 2006 rok.

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

- 01.03.2019 – nadal: zatrudnienie na stanowisku adiunkta badawczo-dydaktycznego, Zakład Mechatroniki i Maszyn Elektrycznych, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki, Politechnika Poznańska.
- 1.10.2011 – 28.02.2019: zatrudnienie na stanowisku asystenta badawczo-dydaktycznego, Zakład Mechatroniki i Maszyn Elektrycznych, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, Wydział Elektryczny, Politechnika Poznańska.

- 1.07.2010 – 30.09.2011: zatrudnienie na stanowisku starszego referenta ds. badawczych, projekt „*Nowa generacja napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa*”.
- 1.04.2010 – 30.07.2010: zatrudnienie na stanowisku starszego referenta ds. technicznych, Zakład Mechatroniki i Maszyn Elektrycznych, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, Wydział Elektryczny, Politechnika Poznańska.
- 1.11.2006 – 1.04.2010: doktorant w Instytucie Elektrotechniki Przemysłowej Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej.

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy

Podstawę wniosku habilitacyjnego stanowi osiągnięcie przedstawione w cyklu publikacji powiązanych tematycznie, które zatytułowano: „*Efektywne metody optymalizacji urządzeń elektromagnetycznych opisanych polowymi modelami zjawisk*”.

Osiągnięcie habilitacyjne stanowi cykl dziesięciu połączonych tematycznie prac zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b ustawy Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z dnia 20 lipca 2018 roku opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych.

Cztery prace zaliczone do cyklu powstały w ramach współpracy naukowej realizowanej z zagranicznymi ośrodkami badawczymi, w tym jedna podczas realizacji projektu Miniatura 3 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

- [A1] **Łukasz Knypiński**, *Optimal design of the rotor geometry of line-start permanent magnet synchronous motor using the bat algorithm*, Open Physics, vol. 15, no.1, pp. 965 – 970, 2017, <https://doi.org/10.1515/phys-2017-0119>.
IF: 0.755, MNiSW: 15, 40¹ pkt.

Habilitant jest jedynym autorem publikacji, w której przedstawił podstawy teoretyczne, model oraz procedurę optymalizacyjną zawierającą algorytm wzorowany na echolokacyjnym zachowaniu nietoperzy. Autor opracował metodę adaptacji algorytmu nietoperzy do uwzględnienia ograniczeń w procesie projektowania przetworników elektromagnetycznych. Opracowany algorytm został zastosowany do optymalnego zaprojektowania geometrii wirnika silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim.

- [A2] **Łukasz Knypiński**, Krzysztof Kowalski, Lech Nowak, *Constrained optimization of the magnetostrictive actuator with the use of penalty function method*, COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and

¹ Komunikat Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 31 lipca 2019 r. w sprawie wykazu czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych wraz z przypisaną liczbą punktów.

electronic engineering, vol. 37, no. 5, pp. 1575 – 1584, 2018, <https://doi.org/10.1108/COMPEL-12-2017-0555>.
IF: 0.705, MNiSW: 15, 40¹ pkt.

W artykule przedstawiono algorytm i oprogramowanie do optymalizacji struktury aktuatora magnetostrykcyjnego z uwzględnieniem jego charakterystyk dynamicznych. Projektowe urządzenie przeznaczone jest do napędu zaworu komory roboczej działającego plazmowego. Charakteryzuje się bardzo krótkim czasem reakcji. Opracowane zostało dwumodułowe oprogramowanie umożliwiające optymalizację struktury obiektu. Testowano skuteczność dwóch strategii: (a) strategię z wielokryterialną kompromisową funkcją celu oraz (b) strategię z funkcją kary. Autor wniosku opracował modyfikację zacierającą różnice pomiędzy zewnętrznymi iteracjami związanymi z narastaniem współczynnika kary, a iteracjami algorytmu genetycznego. Habilitant był reprezentantem wydawniczym zespołu współautorów (autorem korespondencyjnym).

- [A3] **Łukasz Knypiński**, *Adaptation of the penalty function method to genetic algorithm in electromagnetic devices designing*, COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, vol. 38, no. 4, pp. 1285 – 1294, 2019, <https://doi.org/10.1108/COMPEL-12-2017-0555>.
IF: 0.590, MNiSW: 40 pkt.

W artykule przedstawiono metodę adaptacji funkcji kary do algorytmu genetycznego. Wykorzystano transformację sigmoidalną, która zapewniała dodatnią wartość przystosowania. Autor zaproponował zmiany wartości współczynnika kary w każdej iteracji algorytmu optymalizacji. Takie podejście pozwoliło na skrócenie czasu obliczeń procedury optymalizacyjnej. W celu sprawdzenia poprawności metody adaptacji przeprowadzono obliczenia optymalizacyjne aktuatora elektromagnetycznego. Model matematyczny urządzenia zawiera równania pola elektromagnetycznego z uwzględnieniem nieliniowości materiałów ferromagnetycznych.

- [A4] **Łukasz Knypiński**, Karol Pawełoszek, Yvonnick Le Manech, *Optimization of Low-Power Line-Start PM Motor Using Gray Wolf Metaheuristic Algorithm*, Energies, vol. 13, no. 5, 2020, <https://doi.org/10.3390/en13051186>.
IF: 3.004, MEiN: 140 pkt.

W artykule przedstawiono pakiet programów wspomagających proces projektowania silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim. Proces optymalizacji przeprowadzono dla zmodyfikowanego wirnika silnika indukcyjnego przystosowanego do zamocowania dodatkowo magnesów trwałych. Habilitant opracował model polowo-obwodowy silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim. Wykorzystując procedurę optymalizacyjną zawierającą algorytm szarych wilków dobrano wymiary geometryczne magnesów trwałych umieszczonych w wirniku. Autor przystosował metodę szarych wilków do optymalizacji wielokryterialnej silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim. Zaprezentowano zbudowany zgodnie z obliczeniami prototyp i stanowisko do badań silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim. Wyniki pomiarów eksperymentalnych prototypu porównano z wynikami uzyskanymi dla produkowanego seryjnie silnika indukcyjnego. Habilitant był reprezentantem wydawniczym zespołu współautorów.

- [A5] **Łukasz Knypiński**, *Constrained optimization of line-start PM motor based on the gray wolf optimizer*, *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, vol. 23, no. 1, pp. 1 – 10, 2021 <https://doi.org/10.17531/ein.2021.1.1>.
IF: 2.176, MEiN: 140 pkt.

Habilitant jest autorem publikacji, w której przedstawił algorytm oraz oprogramowanie od optymalizacji silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim. W procedurze optymalizacyjnej zastosowano metodę szarych wilków. Autor wniosku zaproponował zmiany współczynnika metody w każdej iteracji procesu optymalizacji. Opracowane oprogramowanie składa się z dwóch modułów: procedury optymalizacyjnej oraz modelu matematycznego silnika. Rozpatrywano zadanie optymalizacji z ograniczeniami. Ograniczenia uwzględniono za pomocą funkcji kary zewnętrznej.

- [A6] **Łukasz Knypiński**, Sebastian Kuroczycki, Fausto Pedro Garcia Marquez, *Minimization of Torque Ripple in the Brushless DC Motor Using Constrained Cuckoo Search Algorithm*, *Electronics*, vol. 10, no. 18, s. 2299-1-2299-20, 2021, <https://doi.org/10.3390/electronics10182299>.
IF: 2.394, MEiN: 100 pkt.

W pracy przedstawiono algorytm obliczeń oraz funkcjonalne oprogramowanie własne do wyznaczania kształtu impulsu napięciowego zasilającego pasma bezszczotkowego silnika prądu stałego (BLDC). Habilitant opracował zastępczy model silnika BLDC. Opracowany model matematyczny silnika jest modelem o parametrach skupionych w którym wartości indukcyjności własnych i wzajemnych uzwojeń oraz przebieg siły elektromotorycznej zostały wyznaczone przy wykorzystaniu metody elementów skończonych. Zastosowano algorytm poszukiwania kukułczego do wyznaczenia kształtu impulsu napięciowego zasilającego zapewniający maksymalną średnią wartość momentu elektromagnetycznego przy zadanej wartości współczynnika pulsacji. Do uwzględnienia ograniczeń wykorzystano funkcję kary statycznej. Habilitant był autorem korespondencyjnym.

- [A7] **Łukasz Knypiński**, *Performance analysis of selected metaheuristic optimization algorithms applied in the solution of an unconstrained task*, *COMPEL – The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 41, no. 5, pp. 1271 – 1284, 2022, <https://doi.org/10.1108/COMPEL-07-2021-0254>.
IF: 0.808, MEiN: 40 pkt.

W artykule przeprowadzono analizę efektywności wybranych metod optymalizacji. Wykonano badania symulacyjne wykorzystując wybrane funkcje testowe dla algorytmów genetycznych, metody roju cząstek, metody wzorowanej na echolokacyjnym zachowaniu nietoperzy, metody poszukiwania kukułczego oraz metody OBI (ang. Only Best Individual – opracowanej przez Autora). Ponadto, w pracy przedstawiono rezultaty porównania zbieżności przywołanych metod optymalizacji rozwiązując zadanie optymalizacji parametrów użytkowych silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim.

- [A8] **Łukasz Knypiński**, Ramesh Devarapalli, Yvonnick Le Menach, *Constrained optimization of the brushless DC motor using salp swarm algorithm*, Archives of Electrical Engineering, vol. 71, no. 3, pp. 775 – 787, 2022, <https://doi.org/10.24425/ae.2022.141684>.

MEiN: 100 pkt.

W pracy przedstawiono algorytm oraz wdrożono oprogramowanie do optymalizacji struktury bezszczotkowego silnika prądu stałego. Do optymalizacji wykorzystano algorytm salpów należący do grona algorytmów inteligencji roju. Habilitant zaproponował modyfikację klasycznej metody salpów. Zbieżność opracowanego algorytmu porównano z algorytmem roju cząstek. Algorytm salpów został przystosowany do uwzględnienia ograniczeń przy wykorzystaniu funkcji kary zewnętrznej. Habilitant był reprezentantem wydawniczym zespołu współautorów.

- [A9] **Łukasz Knypiński**, Frederick Gillon, *Sizing by optimization of line-start synchronous motor*, COMPEL – The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, vol. 41, no. 2, pp. 690 – 702, 2022, <https://doi.org/10.1108/COMPEL-06-2021-0221>.

IF: 0.808, MEiN: 40 pkt.

W artykule przedstawiono algorytm i oprogramowanie własne do kompleksowej optymalizacji parametrów silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim. W zbiorze zmiennych decyzyjnych zostały uwzględniane zmienne decyzyjne opisujące strukturę stojana (4 zmienne) i wirnika (5 zmiennych). W procesie optymalizacji wykorzystano zmodyfikowaną procedurę inicjacji algorytmu genetycznego przystosowaną do optymalizacji silników LSPMSM. Zmodyfikowana procedura optymalizacji opracowana przez Habilitanta znacznie skróciła czas trwania procesu optymalizacji. Habilitant był reprezentantem autorem korespondencyjnym.

- [A10] **Łukasz Knypiński**, *A novel hybrid Cuckoo Search Algorithm for optimization of a line-start PM synchronous motor*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, vol. 71, no. 1, pp. 1 – 8, 2023, <https://doi.org/10.24425/bpasts.2023.144586>

IF: 1.515, MEiN: 100 pkt.

W pracy przedstawiono nowatorską hybrydową metodę przeszukiwania kukułczego. Opracowana metoda jest połączeniem klasycznej metody kukułki z deterministyczną metodą Hooke-Jeeves'a. Efektywność opracowanej metody badano za pomocą testowych funkcji analitycznych. Opracowana metoda wykazała lepszą zbieżność od klasycznej metody kukułki, metody roju cząstek oraz metody nietoperzy. Opracowano algorytm oraz wdrożono oprogramowanie do optymalizacji silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim. Opracowana metoda charakteryzuje większą dokładnością niż klasyczna metoda kukułki.

Analiza cyklu publikacji pod względem wytycznych oceny wg MEiN oraz wskaźnika Impact Factor.

<i>Nr.</i>	<i>Nazwa czasopisma</i>	<i>Punkty wg MEiN</i>	<i>Impact factor</i>
[A1]	Open Phisycs	40	0.755
[A2]	Compel	40	0.705
[A3]	Compel	40	0.590
[A4]	Energies	140	3.004
[A5]	Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability	140	2.176
[A6]	Electronics	100	2.394
[A7]	Compel	40	0.808
[A8]	Archives of Electrical Engineering	100	-
[A9]	Compel	40	0.808
[A10]	Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences	100	1.515
-	Łącznie	780	12.755

Omówienie osiągnięć naukowych Habilitanta

4.1. Wprowadzenie

Projektowanie obiektu technicznego polega na wyznaczeniu takich parametrów jego struktury, przy których spełnione są wszystkie narzucone wymagania. Parametry funkcjonalne (elektryczne, mechaniczne oraz termiczne) projektowanego obiektu muszą mieścić się w zadanych przedziałach, przyjętych przed rozpoczęciem procesu projektowania.

Tak postawione zadanie może mieć wiele rozwiązań, które można porównywać pod względem wybranego kryterium. W projektowaniu optymalnym, spośród wielu możliwych struktur urządzenia poszukuje się takiej, przy której kryterium osiąga wartość optymalną – najczęściej maksymalną lub minimalną. Kryterium optymalności może stanowić wybrany parametr funkcjonalny urządzenia lub kombinacja kilku parametrów (funkcjonalnych i ekonomicznych). W teorii optymalizacji taki proces nazywamy zadaniem optymalizacji z ograniczeniami, a kryterium optymalności – funkcją celu (jedno- lub wielokryterialną).

Proces projektowania jest procesem iteracyjnym; polega zazwyczaj na iteracyjnym powtarzaniu procesu symulacji zjawisk dla różnych wariantów (struktur) obiektu – z wykorzystaniem matematycznego modelu tych zjawisk i wyznaczaniu na tej podstawie parametrów funkcjonalnych tego obiektu. W procesie sprawdza się czy spełnione są ograniczenia oraz porównuje parametry kryterialne. Generowanie ciągu struktur może odbywać się według zasad deterministycznych lub zasad probabilistycznych.

Wiarygodność uzyskanych w procesie optymalizacji wyników zależy od dokładności matematycznych modeli zjawisk zachodzących w obiekcie. Dlatego współcześnie wykorzystuje się modele dokładne, głównie modele polowe, polowo-obwodowe i najbardziej zaawansowane – sprzężone modele różnych zjawisk fizycznych, na przykład zjawisk elektromagnetycznych, mechanicznych i termicznych. Konieczne jest przy tym rozpatrywanie różnych stanów pracy – zarówno stanów ustalonych, jak również stanów przejściowych i dynamicznych.

Modelem nazywamy matematyczny opis urządzenia elektromagnetycznego, który odwzorowuje występujące w nim zjawiska. W projektowaniu nowoczesnych przetworników elektromagnetycznych, charakteryzujących się dużą różnorodnością struktur oraz zastosowanych materiałów konieczne jest opracowanie jak najbardziej dokładnego modelu występujących zjawisk. Obecnie w obliczeniach projektowych i optymalizacyjnych urządzeń elektromagnetycznych są wykorzystywane trzy rodzaje modeli: (a) modele o parametrach skupionych, (b) modele polowe oraz (c) modele zastępcze opracowane na podstawie obliczeń polowych (ang. surrogate models).

Zjawiska występujące w przetwornikach elektromagnetycznych i elektromechanicznych mają charakter polowy, jednak zazwyczaj przetworniki te są zasilane napięciowo i dlatego do analizy niestabilnych stanów pracy współcześnie wykorzystywane są modele polowo-obwodowe.

W modelach o parametrach skupionych zjawiska o charakterze polowym są uwzględniane w sposób uproszczony. Modele tego typu sprowadzają się do rozpatrywania schematu zastępczego urządzenia i nie są skomplikowane obliczeniowo.

W modelach polowych parametry funkcjonalne obiektu są obliczane na podstawie rozkładu pola elektromagnetycznego, przy czym do wyznaczenia rozkładu pola najczęściej wykorzystywana jest metoda elementów skończonych. Modele polowe pozwalają na wyznaczenie parametrów funkcjonalnych w sposób bardzo dokładny, jednak wykonanie obliczeń nawet dla pojedynczego wariantu urządzenia jest zdecydowanie bardziej czasochłonne.

Dlatego, w celu minimalizacji czasu obliczeń optymalizacyjnych, często są wykorzystywane modele zastępcze, będące analitycznym zapisem zależności wyznaczonych na podstawie obliczeń polowych dla różnych wariantów analizowanego urządzenia. Na podstawie uzyskanych wyników analizy polowej tworzone są równania modelu matematycznego wykorzystywane do wyznaczenia parametrów funkcjonalnych w procesie optymalizacji.

Adaptacja zaawansowanych matematycznych modeli zjawisk w układach elektromagnetycznych (modeli polowych i modeli sprzężonych) do procedur optymalizacji, jak również opracowanie nowych ujęć tych modeli **jest jednym z głównych zadań jakie postawił sobie Autor niniejszego wniosku.**

Do osiągnięć Autora w zakresie tworzenie modeli matematycznych i ich komputerowych implementacji można zaliczyć:

- polowo-obwodowy model bezszczotkowego silnika prądu stałego (BLDC) uwzględniający zjawiska nieliniowości obwodu magnetycznego [1], do wyznaczenia rozkładu pola magnetycznego w środowisku nieliniowym wykorzystana została metoda Newtona-Raphsona,
- polowo-obwodowy model aktuatora elektromagnetycznego z uwzględnieniem regulatora pracującego w zamkniętej pętli regulacji [2],
- polowo-obwodowy model silnika BLDC uwzględniający równania równowagi mechanicznej oraz układu komutatora elektronicznego [3],
- zastosowanie procedur optymalizacji do wyznaczania parametrów modelu Jilesa-Athertona opisującego zjawisko histerezy magnetycznej [4],
- polowo-obwodowy model aktuatora magnetostrykcyjnego [5],
- model silnika BLDC o parametrach skupionych, w którym wartości indukcyjności (własnych i wzajemnych) oraz wartości siły elektromotorycznej wyznaczone są z wykorzystaniem metody elementów skończonych [A6],
- polowo-obwodowy model aktuatora elektromagnetycznego [A3],
- polowo-obwodowy model silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim [A4],
- model matematyczny układu napędowego dźwigu wieżowego [6].

Wykorzystanie powyższych (dokładnych) modeli w procedurach projektowania, a w szczególności w procedurach optymalizacji z ograniczeniami wymaga ich adaptacji [A3, A8] i modyfikacji [A9], a nawet opracowania nowych ujęć tych algorytmów [A10].

Adaptacja i modyfikacja procedur optymalizacji w taki sposób, by mogły efektywnie i skutecznie współdziałać z zaawansowanymi numerycznymi modelami symulacyjnymi jest **drugim głównym przedmiotem badań Autora**.

Potrzeba opracowywania adaptacji, modyfikacji i opracowywania nowych ujęć optymalnego projektowania wynika przede wszystkim z bardzo licznie prezentowanych w literaturze nowych struktur i odmian konstrukcyjnych maszyn elektrycznych i innych przetworników elektromagnetycznych. Należą do nich:

- synchroniczne silniki o wzbudzeniu elektromagnetycznym przeznaczone do napędu elektrycznego pojazdów [7],
- nowatorskie konstrukcje aktuatorów elektromagnetycznych [8],
- synchroniczne silniki o wzbudzeniu hybrydowym [9],
- generatory i silniki magnetoelektryczne o strumieniu poprzecznym [10, 11],

- aktuatorzy piezoelektryczne oraz magnetostrykcyjne [12, 13],
- reluktancyjne silniki synchroniczne wspomagane magnesami trwałymi [14],
- maszyny o strukturze Verniera [15],
- reluktancyjne silniki synchroniczne o rozruchu bezpośrednim [16],
- liniowe silniki synchroniczne [17, 18],
- wielofazowe silniki synchroniczne z magnesami trwałymi [19],
- -magnetoelektryczne silniki o strumieniu poprzecznym [20].

W przypadku nowych konstrukcji często brak jest ogólnych zasad doboru głównych parametrów charakteryzujących obiekty, zapewniających uzyskanie wymaganych właściwości, a także brak zaleceń dotyczących metodyki ich projektowania i optymalizacji.

Dlatego głównym celem badań prowadzonych przez autora wniosku było opracowanie zasad optymalnego projektowania (optymalizacji z ograniczeniami) wybranych maszyn i urządzeń elektromagnetycznych, doboru efektywnych metod optymalizacji i opracowanie wytycznych dotyczących doboru najważniejszych wymiarów charakteryzujących strukturę, a także właściwości funkcjonalne tych obiektów.

Autor ukierunkował swoje badania na metody niedeterministyczne, to jest metody probabilistyczne i algorytmy inspirowane naturą (metody heurystyczne). Tego typu metody są obecnie tworzone i badane w wielu ośrodkach naukowych na całym świecie.

W deterministycznych algorytmach optymalizacji rozwiązania optymalnego w każdej iteracji poszukuje się analizując pojedynczy punkt w przestrzeni zmiennych projektowych (zmiennych decyzyjnych), to znaczy analizując pojedynczy wariant urządzenia. Kolejne kierunki poszukiwań wyznaczane są w zależności od rodzaju metod: (a) na podstawie aktualnej wartości gradientu w punkcie (metody gradientowe), lub (b) na podstawie bazy kierunków przyjętej przed rozpoczęciem poszukiwań (metody bezgradientowe).

Wadą algorytmów deterministycznych jest ich częste „utykanie” w ekstremach lokalnych; końcowy wynik optymalizacji zależy często od punktu startowego. Ponadto, metody deterministyczne zazwyczaj „źle” współpracują z polowymi, a więc numerycznymi modelami urządzeń elektromagnetycznych. Nie jest możliwe dokładne wyznaczenie wartości gradientu, co jest konieczne np. w metodzie najszybszego spadku lub w metodzie gradientów sprzężonych. W przypadku wyznaczania rozkładu pola przy wykorzystaniu modelu zawierającego pętle iteracyjne (związane np. ze zjawiskiem nieliniowości) warunkiem zakończenia obliczeń jest uzyskanie dopuszczalnej bezwzględnej wartości błędu. Jeżeli uwzględni się ten dopuszczalny błąd, to wyznaczona wartości gradientu może być całkowicie błędna. Takie same problemy występują przy zastosowaniu metod

deterministycznych bezgradientowych, gdy długość kroku próbkowania spada poniżej wartości błędu procedury iteracyjnej związanej z wyznaczeniem rozkładu pola.

Powyższych niedogodności unika się stosując metody niedeterministyczne. W algorytmach tych, rozwiązanie optymalnego, poszukuje się w obszarze dopuszczalnym wykorzystując grupę osobników, odpowiadającą zbiorowi punktów w przestrzeni decyzyjnej, czyli zbiorowi wariantów urządzenia. Osobniki tworzące grupę mogą rywalizować (algorytm genetyczny) lub współpracować (metoda roju cząstek, metoda szarych wilków i inne) [A7]. Grupa osobników w zależności od metody optymalizacji jest nazywana: (a) populacją (algorytmy genetyczne), (b) rojem (metoda roju cząstek), (c) kolonią (metoda wzorowana na echolokacyjnym zachowaniu nietoperzy oraz metoda salpów) [21], a nawet, (d) watahą (metoda szarych wilków). W metodach metaheurystycznych wyznaczenie położenia wszystkich osobników (dopuszczalnych wariantów projektowanego urządzenia) odbywa się przy uwzględnieniu liczb losowych. Dlatego, proces optymalizacji należy zwykle powtórzyć kilkakrotnie dla losowego, początkowego rozmieszczenia osobników w obszarze dopuszczalnym. **Uwzględnianie współczynników losowych i różnorodność modeli matematycznych powodują, że algorytmy niedeterministyczne różnią się efektywnością i właściwościami.**

Metody niedeterministyczne bardzo dobrze współpracują z polowymi modelami numerycznymi, ponieważ położenia osobników w kolejnej iteracji wyznaczane są najczęściej na podstawie informacji o współrzędnych lidera (najlepiej przystosowanego osobnika w grupie) lub kilku najlepiej przystosowanych osobników (metoda szarych wilków). Ponadto, metody metaheurystyczne są bardzo dogodne do uwzględnienia ograniczeń w procesie projektowania przy wykorzystaniu funkcji kary [24].

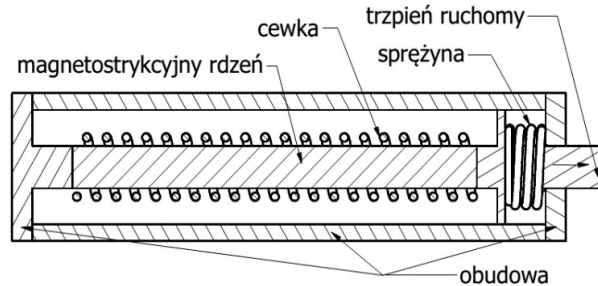
Dlatego Kandydat skoncentrował się w swoich badaniach naukowych nad adaptacją, modyfikacją wybranych metod heurystycznych do rozwiązywania zadań optymalnego projektowania (bez ograniczeń oraz z uwzględnieniem ograniczeń) urządzeń elektromagnetycznych.

4.2. Adaptacja zaawansowanych matematycznych modeli zjawisk w układach elektromagnetycznych

4.2.1. Polowo-obwodowy model zjawisk nieustalonych w aktuatorze z rdzeniem magnetostrykcyjnym [21]

Autor uczestniczył w opracowaniu parametrycznego polowo-obwodowego modelu zjawisk w aktuatorze z rdzeniem magnetostrykcyjnym. Aktuator magnetostrykcyjny był przeznaczony do napędu zaworu doprowadzającego medium (najczęściej gaz) do komory impulsowego działu plazmowego, stosowanego do badań fizyki plazmy oraz inżynierii materiałowej. Urządzenie charakteryzuje się małym przesunięciem elementu ruchomego (poniżej 0,1 mm) oraz bardzo krótkim czasem

odpowiedzi (poniżej 100 mikrosekund). W celu uniknięcia indukowania się prądów wirowych w stanach dynamicznych, rdzeń i obudowa zostały wykonane z materiałów o bardzo dużej rezystywności. Strukturę aktuatora przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Struktura aktuatora magnetostrykcyjnego o symetrii osiowej

W efekcie przeprowadzonych prac badawczych został opracowany polowo-obwodowy model nieustalonych zjawisk elektromagnetycznych. Aktuator zasilany jest z baterii kondensatorów, zatem pole magnetyczne wymuszane jest napięciowo, a przebieg prądu $i(t)$ w uzwojeniu nie jest znany przed wyznaczeniem rozkładu pola elektromagnetycznego. Ponadto, nie jest znany przebieg napięcia kondensatora $u_c(t)$. Model zawiera równania opisujące nieustalone pole magnetyczne w nieliniowym środowisku ferromagnetycznym oraz równanie obwodu elektrycznego z uwzględnieniem pojemności C .

Nowym aspektem w opracowanym modelu była konieczność uwzględnienia dwóch rodzajów nieliniowości: (a) nieliniowości charakterystyki magnesowania części ferromagnetycznych oraz (b) nieliniowości krzywej opisującej współczynnik magnetostrykcji $\lambda(H)$.

Do wyznaczenia rozkładu pola w projektowanym akuatorze magnetostrykcyjnym zastosowano metodę elementów skończonych oraz dyskretyzację czasu (tzw. schemat Cranka-Nicolsona). Z powodu nieliniowości charakterystyki magnesowania części ferromagnetycznych zastosowano iteracyjną procedurę Newtona-Raphsona.

W celu wyznaczenia całkowitego względnego wydłużenia $\lambda(t)$, Autor zaproponował podzielenie rdzenia na m_w warstw o grubości h_m . Średnia wartość indukcji magnetycznej w m -tej warstwie (B_{srm}) obliczana jest według zależności:

$$B_{srm} = 0,5(\Phi(r_c, z_{md}) + \Phi(r_c, z_{mg})) / \pi r_c^2, \quad (1)$$

przy czym z_{md}, z_{mg} – osiowe współrzędne dolnej i górnej powierzchni m -tej warstwy, r_c – promień rdzenia, $\Phi(t)$ – wartość węzłowa wektorowego potencjału magnetycznego.

Następnie, z charakterystyki magnesowania rdzenia, jest wyznaczana średnia wartość natężenia pola $H_{srm} = f(B_{srm})$, a na tej podstawie, z charakterystyki $\lambda(H)$, względne wydłużenie m -tej warstwy $\lambda_m = \lambda(H_{srm})$, oraz jej wydłużenie bezwzględne $\Delta h_m = \lambda_m h_m$. Całkowite bezwzględne wydłużenie rdzenia oblicza się:

$$\Delta h = \sum_{m=1}^{m_w} \Delta h_m \quad (2)$$

a jego całkowite wydłużenie względne: $\lambda = \Delta h/h_c$.

Wyniki przeprowadzonych przez Autora wniosków analiz potwierdziły, że w przypadku urządzeń elektromagnetycznych wykonanych z materiałów magnetostrykcyjnych dla uzyskania wiarygodności modelu matematycznego konieczne jest uwzględnienie dwóch rodzajów nieliniowości. Zastosowanie opracowanego modelu pozwala na wyznaczenie względnego wydłużenia rdzenia magnetostrykcyjnego w sposób dokładny.

4.2.2. Polowo-obwodowy model silnika BLDC [A8]

Pole magnetyczne w silnikach BLDC jest wzbudzone przez: uzwojenia pasmowe stojana oraz magnesy trwałe. Pole to w urządzeniach elektromagnetycznych jest zazwyczaj wymuszane napięciowo. Z uwagi na nieliniową charakterystykę ferromagnetycznego rdzenia oraz występujące elementy ruchome w silnikach BLDC zasilanych ze źródła napięcia stałego, nie są znane przebiegi prądów w pasmach silnika. Przebiegi tych prądów są konieczne do wyznaczenia rozkładu pola magnetycznego w silniku.

Habilitant opracował polowo-obwodowy model pozwalający na jednoczesne rozwiązanie układu równań pola magnetycznego (z uwzględnieniem nieliniowości) oraz równania obwodów elektrycznych.

W silnikach BLDC pod wpływem obracającego się wirnika w uzwojeniach stojana indukowane są siły elektromotoryczne rotacji, na podstawie których wyznacza się sekwencję przełączania komutatora elektronicznego i algorytm sterowania silnikiem.

W stanach dynamicznych (rozruch, zmiany obciążenia, komutacja pasm) prędkość obrotowa zmienia się w nieznanym sposób. W takim przypadku konieczne jest uwzględnienie w modelu matematycznym równania równowagi dynamicznej.

Autor opracował model matematyczny (model polowo-obwodowy z uwzględnieniem komutatora elektronicznego oraz równania równowagi dla ruchu obrotowego) oraz procedury służące do wyznaczania parametrów funkcjonalnych silnika stanowiące oddzielny moduł, który może być połączony z procedurami optymalizacji.

4.2.3. Zastępczy model silnika BLDC [A6]

Zastosowanie polowo-obwodowych modeli zjawisk w optymalizowanym urządzeniu elektromagnetycznym wydłuża całkowity czas realizacji procedury optymalizacyjnej. Dlatego, coraz częściej naukowcy zajmujący się problemami projektowania i optymalizacji opracowują modele zastępcze, zapewniające pożądaną dokładność uzyskiwanych wyników.

Autor opracował zastępczy model bezszczotkowego silnika prądu stałego z uwzględnieniem komutatora elektronicznego. Parametry skupione, takie jak indukcijności własne oraz indukcijności wzajemne zostały wyznaczone na podstawie serii obliczeń symulacyjnych wykonanych przy wykorzystaniu polowo-obwodowego modelu zjawisk [A8]. W opracowanym modelu wartości indukcijności własnych i wzajemnych zostały wyznaczone dla zadanych wartości prądów pasmowych stojana. Model zastępczy zawierał tablicę indukcijności własnych i wzajemnych dla różnych wartości prądów. Habilitant wyznaczył przebiegi sił elektromotorycznych rotacji dla wybranych wartości momentu obciążenia i zapisał je w tablicach. Podczas obliczeń optymalizacyjnych „aktualne” wartości indukcijności oraz sił elektromotorycznych wyznaczane są z wykorzystaniem wartości zawartych we wspomnianych tablicach.

Tak opracowany model pozwolił na uzyskanie dużej wiarygodności obliczeń symulacyjnych oraz znaczne skrócenie czasu obliczeń optymalizacyjnych.

4.2.4. Polowy model aktuatora elektromagnetycznego [A3]

Autor opracował polowy model osiowosymetrycznego aktuatora elektromagnetycznego. Model matematyczny zawierał: równania pola magnetycznego uwzględniające nieliniowości materiałów ferromagnetycznych oraz równanie obwodu zasilającego. Do wyznaczenia rozkładu pola magnetycznego o symetrii osiowej zastosowano metodę elementów skończonych. Wartość siły działającej na nur aktuatora wyznaczono na podstawie tensora naprężeń Maxwella.

Opracowany model uwzględniał również zjawiska cieplne występujące w osiowosymetrycznym akuatorze. Habilitant wykorzystał sieciowy model schematu cieplnego, w którym uwzględniono rezystancje odpowiadające przewodności cieplnej oraz radiacji odpowiadające poszczególnym elementom konstrukcyjnym urządzenia [22].

Model aktuatora został opracowany w sposób parametryczny umożliwiający modyfikacje trzech parametrów obwodu magnetycznego (zmienne decyzyjne w procesie optymalizacji). Opracowany model Autor połączył z procedurami optymalizacyjnymi.

4.2.5. Polowo-obwodowy model silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim [A4]

Silniki synchroniczne o rozruchu bezpośrednim (LSPMSM) łączą zalety dwóch rodzajów silników: indukcyjnych i synchronicznych. LSPMSM mogą być stosowane jako zamienniki silników indukcyjnych. Rozruch silników tego typu jest możliwy dzięki momentowi asynchronicznemu wytwarzanemu przez uzwojenie klatkowe wirnika. W warunkach pracy ustalonej, maszyna pracuje z prędkością synchroniczną i wytwarza moment synchroniczny dzięki umieszczonym w wirniku magnesom trwałym.

Silniki synchroniczne o rozruchu bezpośrednim charakteryzują się wyższą sprawnością oraz większym współczynnikiem mocy od silników indukcyjnych. Wadą tych silników jest mała zdolność synchronizacji i relatywnie mała wartość momentu rozruchowego.

Autor opracował polowo-obwodowy model czterobiegunowego silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim. Model został uzupełniony procedurami parametrycznymi, które umożliwiają bezpośrednią modyfikację parametrów strukturalnych obwodu magnetycznego oraz wymiarów magnesów.

Opracowany model składał się z dwóch niezależnych modeli: (a) modelu służącego do wyznaczenia parametrów funkcjonalnych silnika w warunkach pracy ustalonej oraz (b) modelu służącego do analizy stanu rozruchu. Pierwszy z modeli umożliwiał wyznaczenie wartości współczynnika mocy oraz sprawności analizowanej struktury silnika LSPMSM. Natomiast w drugim modelu analizowano rozruch silnika i oceniano zdolność silnika do skutecznej synchronizacji. **Opracowany model Autor połączył z procedurami optymalizacyjnymi.**

Podsumowanie

Prowadzone przez Autora wniosku badania polegały na adaptacji modeli opisujących zjawiska w układach elektromagnetycznych prowadzących do formuł pozwalających skutecznie przeprowadzić proces optymalizacji wybranych parametrów funkcjonalnych przetwornika. **Habilitant opracował własne modele oraz wdrożył szereg procedur optymalizacyjnych wykorzystujących te modele.**

Do najważniejszych osiągnięć Autor zalicza:

- udział w opracowaniu parametrycznego polowo-obwodowego modelu aktuatora z rdzeniem magnetostrykcyjnym uwzględniającego dwa rodzaje nieliniowości,
- opracowanie polowo-obwodowego modelu zjawisk elektromagnetycznych w bezszczotkowym silniku prądu stałego,
- opracowanie zastępczego modelu bezszczotkowego silnika prądu stałego,
- opracowanie polowego modelu osiowosymetrycznego aktuatora elektromagnetycznego,
- opracowanie polowo-obwodowego modelu silnika o rozruchu bezpośrednim.

4.3. Przystosowanie algorytmów niedeterministycznych do rozwiązywania zadań optymalnej syntezy przetworników elektromagnetycznych z uwzględnieniem ograniczeń

Znajdujące się w zakresie zainteresowań Autora metody heurystyczne zostały opracowane na podstawie obserwacji zasad organizacji społecznej stad zwierząt

w ich środowiskach naturalnych. Każda z metod uwzględnia współczynniki losowe przy wyznaczaniu położenia osobników w kolejnych iteracjach (krokach czasowych). Modele matematyczne metod optymalizacyjnych są jednak różne, ponieważ odzwierciedlają różne rodzaje zwierząt i mniej lub bardziej zaawansowane formy społeczne stad. Dlatego przebiegi procesów optymalizacji dla każdej metody różnią się. **Konieczne jest dostosowanie każdej z metod do uwzględniania ograniczeń, jak również odpowiednie dobranie współczynników charakteryzujących każdą metodę do rodzaju projektowanego przetwornika elektromagnetycznego.**

Habilitant samodzielnie opracował wszystkie procedury optymalizacyjne wszystkich badanych metod. Zaproponował szereg modyfikacji poprawiających efektywność badanych metod optymalizacji. Ponadto wdrożył autorskie aplikacje (oprogramowanie) do optymalizacji wybranych urządzeń elektromagnetycznych. Opracowane programy składają się z dwóch niezależnych modułów: modułu optymalizacyjnego zawierającego procedurę optymalizacji oraz modułu zawierającego model matematyczny obiektu. Taka organizacja oprogramowania zwiększa jego uniwersalność – umożliwia łatwą zamianę stosowanej metody optymalizacji oraz zmianę modelu matematycznego projektowanego przetwornika.

4.3.1. Algorytm wzorowany na echolokacyjnym zachowaniu nietoperzy [A1]

W artykule przedstawiono metodę wzorowaną na echolokacyjnym zachowaniu nietoperzy (ang. Bat Algorithm – BA) [23]. Metoda została opracowana na podstawie obserwacji małych gatunków nietoperzy, wykorzystujących zjawisko echolokacji. Echolokacja pomaga nietoperzom w dokładnej orientacji podczas poruszania się, umożliwia omijanie przeszkód podczas lotu oraz zdobywanie pożywienia. Grupa nietoperzy tworzących stado nazywana jest kolonią. W kolejnych iteracjach kolonia przemieszcza się w n -wymiarowej przestrzeni rozwiązywanego zadania, gdzie n jest liczbą zmiennych decyzyjnych.

Każdy nietoperz jest opisany poprzez następujące parametry: wektor położenia \mathbf{x} , wektor prędkości \mathbf{v} , współczynnik emisyjności impulsów r oraz współczynnik głośności A . W k -tym kroku czasowym dla i -tego nietoperza wektor prędkości oblicza się według zależności:

$$\mathbf{v}_k^i = \mathbf{v}_{k-1}^i + f^i \cdot (\mathbf{x}_{k-1}^i - \mathbf{x}_B), \quad (3)$$

w której: $f^i = f_{\min} + r_1(f_{\max} - f_{\min})$, f_{\max} , f_{\min} – maksymalna i minimalna wartość częstotliwości, r_1 – liczba losowa z przedziału (0, 1).

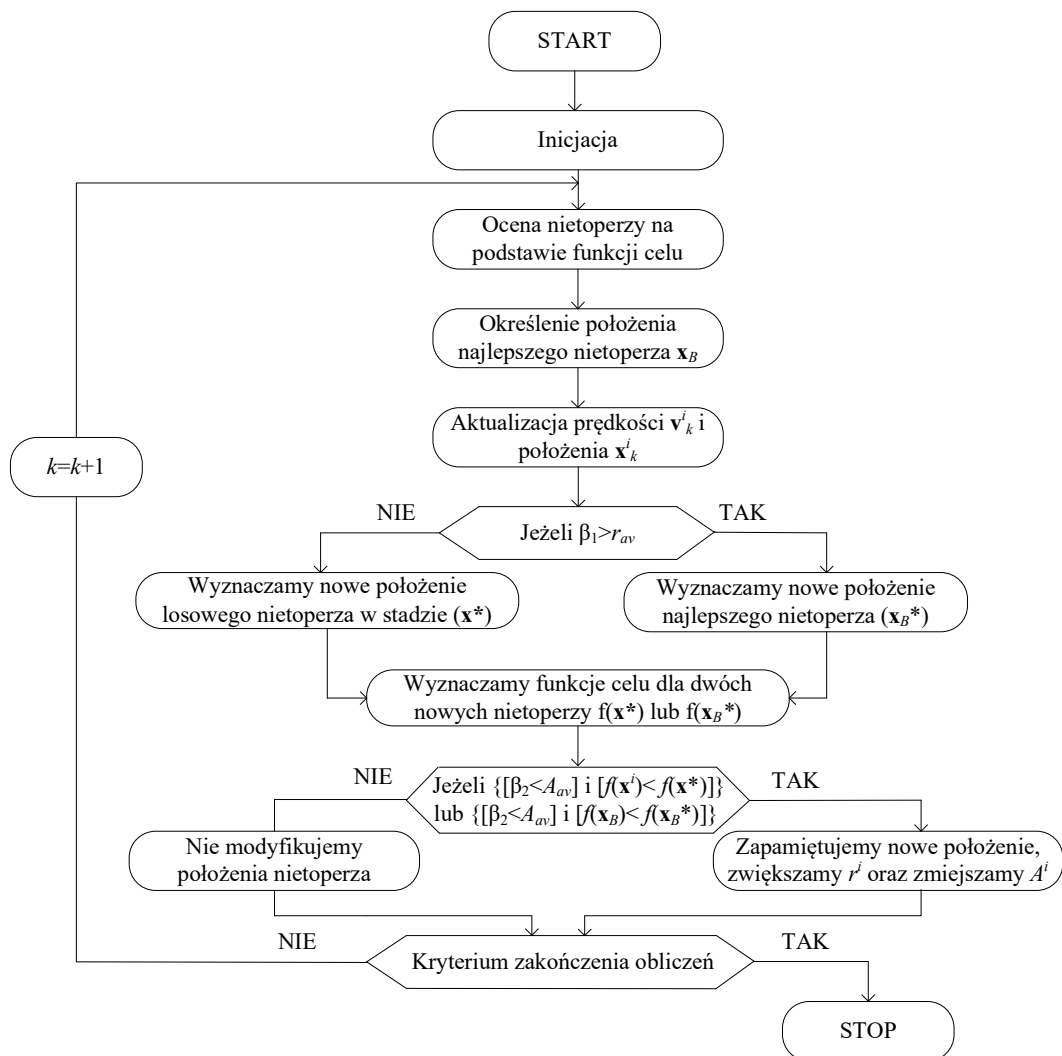
Po wyznaczeniu wektora prędkości aktualizowane jest jego położenie:

$$\mathbf{x}_k^i = \mathbf{x}_{k-1}^i + \mathbf{v}_k^i. \quad (4)$$

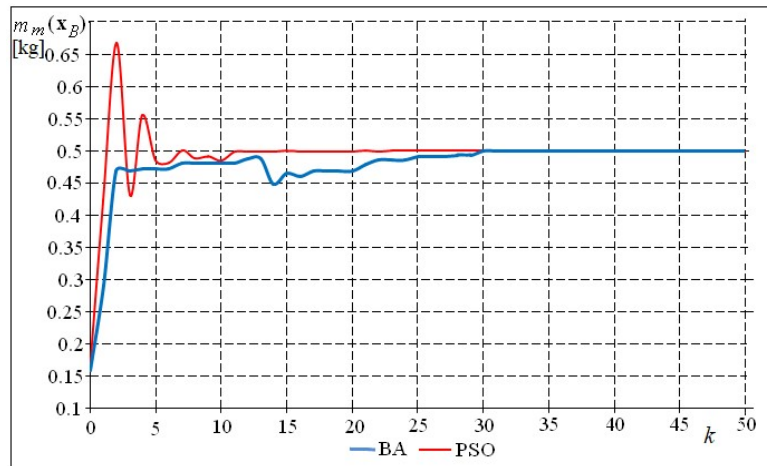
Schemat blokowy algorytmu nietoperzy przedstawiono na rysunku 2. **Habilitant opracował i wdrożył procedurę optymalizacji zawierającą metodę wzorowaną na echolokacyjnym zachowaniu nietoperzy.**

Opracowana przez Habilitanta procedura optymalizacyjna została połączona z modelem matematycznym silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim (LSPMSM). Model matematyczny silnika LSPMSM został przygotowany w środowisku Ansys Maxwell. Optymalizowany obiekt był opisany przez cztery zmienne decyzyjne określające strukturę obwodu magnetycznego wirnika.

Habilitant wykonał serię obliczeń optymalizacyjnych oraz analizował zbieżność i skuteczność metody wzorowanej na echolokacyjnym zachowaniu nietoperzy. Wyznaczone zostało odchylenie standardowe. Ponadto porównano opracowaną procedurę z procedurą optymalizacji zawierającą metodę roju cząstek (PSO). Obserwowano przebiegi procesu optymalizacji dla obu tych procedur. Rysunek 3 ilustruje zmiany masy magnesów trwałych tworzących układ wzbudzenia w kolejnych iteracjach procesu optymalizacji dla najlepiej przystosowanego osobnika dla metod BA i PSO.



Rys. 2. Schemat blokowy metody wzorowanej na echolokacyjnym zachowaniu nietoperzy



Rys. 3. Wartości masy magnesów trwałych dla lidera grupy w kolejnych iteracjach procesu optymalizacji

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń testowych Habilitant wykazał, że **metoda nietoperzy jest algorytmem o gorszej zbieżności niż klasyczna metoda roju cząstek**. Metoda BA polega na losowym przemieszczaniu (przeszukiwaniu) osobników tworzących kolonie wokół lidera. **W przypadku zastosowania algorytmu nietoperzy do procesu optymalizacji wybranego urządzenia elektromagnetycznego bardzo ważne jest odpowiednie dobranie zakresu zmian częstotliwości**. Dobranie niewłaściwego zakresu zmian częstotliwości f (zbyt dużej lub zbyt małej) **może prowadzić do pogorszenia efektywności (skuteczności) algorytmu, a nawet utknięcia w punkcie ekstremum lokalnego**.

Metodę wzorowaną na echolokacyjnym zachowaniu nietoperzy można wykorzystywać do rozwiązywania zadań optymalizacji przetworników elektromagnetycznych z uwzględnieniem ograniczeń. Ograniczenia można uwzględniać wykorzystując funkcję kary zewnętrznej. **Kandydat wykazał, że zmiany współczynnika wagi (a^k) po wykonaniu 5 – 10 iteracji metody nietoperzy zapewnia najlepszą zbieżność procedury optymalizacyjnej**.

4.3.2. Algorytm genetyczny [A2], [A3]

W artykułach [A2] oraz [A3] przedstawiono rezultaty eksperymentów numerycznych z zastosowaniem metody algorytmu genetycznego w obliczeniach optymalizacyjnych aktuatora magnetostrykcyjnego oraz aktuatora elektromagnetycznego.

Autor wdrożył oprogramowanie do optymalizacji aktuatora magnetostrykcyjnego przeznaczonego do napędu zaworu komory roboczej działa plazmowego [A2]. Ze względu na wymagania dotyczące bardzo krótkiego czasu zadziałania projektowanego urządzenia jako element wykonawczy (tzw. nur aktuatora) zastosowano walec wykonany z materiału magnetostrykcyjnego – terfenolu.

Aktuator magnetostrykcyjny optymalizowany był przy wykorzystaniu dwóch podejść: optymalizacji wielokryterialnej oraz optymalizacji z uwzględnieniem ograniczeń. Do uwzględnienia ograniczeń zastosowano funkcję kary zewnętrznej.

W klasycznym ujęciu funkcji kary zadanie z uwzględnieniem ograniczeń jest zamieniane na ciąg zadań bez ograniczeń. Ich rozwiązania tworzą ciąg, który powinien zbiegać się do rozwiązania zadania pierwotnego, tj. zadania z uwzględnieniem ograniczeń. **Habilitant wykazał, że w przypadku zastosowania metody algorytmu genetycznego wynik zbliżony do optymalnego można uzyskać po około 30% obliczeń przeprowadzonych dla optymalizacji bezwarunkowej w klasycznej metodzie funkcji kary [A2]. Dlatego Kandydat zaleca, aby karę zmieniać „wcześniej”, tj. przed osiągnięciem optimum dla rozpatrywanej iteracji związanej ze zmianami kary.**

Habilitant zaproponował modyfikację zacierającą różnice pomiędzy zewnętrznymi iteracjami związanymi z narastaniem współczynnika kary (a^k), a iteracjami (generacjami) algorytmu genetycznego. W proponowanym podejściu iteracje kary związane ze zmianami kary oraz kolejne pokolenia algorytmu genetycznego wzajemnie się przenikają.

Autor przeprowadził badania symulacyjne podczas których współczynnik kary zmieniany był po wykonaniu obliczeń dla określonej liczby (N_{gen}) pokoleń algorytmu genetycznego. Wykonano obliczenia dla $N_{\text{gen}} = 20$, $N_{\text{gen}} = 6$ oraz $N_{\text{gen}} = 4$. Przeprowadzone badania procesów optymalizacyjnych dla różnych wartości N_{gen} wykazały, że łączna liczba generacji potrzebnych do uzyskania wyniku optymalnego wymagała odpowiednio: 107 ($N_{\text{gen}} = 20$), 42 ($N_{\text{gen}} = 6$) oraz 29 ($N_{\text{gen}} = 4$) pokoleń. **Habilitant wykazał, że zmiany współczynnika kary zbyt szybko (przy $N_{\text{gen}} = 1$ lub $N_{\text{gen}} = 2$) prowadzą do nieefektywnego działania algorytmu genetycznego.**

Funkcja kary zewnętrznej jest skuteczna dla algorytmu genetycznego. **Jednak w przypadku opisu projektowanego urządzenia przy wykorzystaniu połowego modelu zjawisk, w celu skrócenia czasu trwania procesu optymalizacji wymaga modyfikacji.**

Opracowana przez Habilitanta modyfikacja **pozwała na uzyskanie optymalnego rozwiązania klika, a nawet kilkanaście razy szybciej niż metoda algorytmu genetycznego połączona z klasyczną metodą funkcji kary.**

Problemem w zastosowaniu metody funkcji kary zewnętrznej jest karanie poszczególnych osobników w taki sposób, aby algorytm nie utknął w ekstremum lokalnym [A3, 23]. **W klasycznych metodach oraz metodach zmodyfikowanych współczynnik kary w kolejnych iteracjach jest zazwyczaj zwiększany [A2].** W metodzie algorytmu genetycznego wszystkie osobniki w obrębie jednego pokolenia mogą mieć przybliżoną wartość przystosowania po wykonaniu kilku pokoleń algorytmu genetycznego. W takich przypadkach zwiększenie współczynnika kary może uniemożliwić całej populacji opuszczenie obszaru wokół ekstremum lokalnego.

Autor opracował metodę adaptacji funkcji kary do rozwiązania zadań optymalizacji z ograniczeniami [A3]. Efektywność opracowanej modyfikacji testowano wykorzystując funkcje analityczne oraz rozwiązując zadanie optymalnej syntezy aktuatora elektromagnetycznego. Optymalizowany aktuator został opisany przy wykorzystaniu trzech zmiennych decyzyjnych.

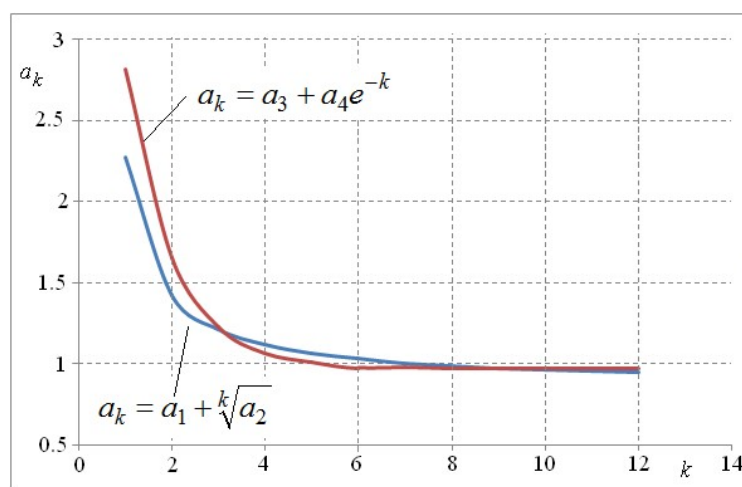
Habilitant zaproponował modyfikację podejścia funkcji kary poprzez zmianę współczynnika kary w każdym pokoleniu algorytmu genetycznego w sposób ciągły (płynny). Przeprowadzone obliczenia symulacyjne wykazały podobnie jak w pracy [A2], że zbyt szybkie zwiększanie współczynnika kary może doprowadzić do utknięcia algorytmu w punkcie ekstremum lokalnego. **Dlatego Autor zaproponował zmniejszanie współczynnika kary według następujących zależności:**

$$a_k = a_1 + \sqrt[k]{a_2}, \quad (5)$$

$$a_k = a_3 + a_4 e^{-k}, \quad (6)$$

przy czym: $a_1 = -0.13$, $a_2 = 2.4$, $a_3 = 0.97$, $a_4 = 5$ – stałe liczbowe, a_k – współczynnik kary, k – numer pokolenia (iteracji) algorytmu genetycznego.

Zmiany wartości współczynnika a_k w kolejnych pokoleniach algorytmu genetycznego przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Krzywe $a_k=f(k)$

Stosując metodę ruletki przystosowanie każdego osobnika musi być dodatnie. Proponowane przez Autora rozpoczęcie procesu optymalizacji dla dużej wartości współczynnika kary (rys. 4) powoduje, że przystosowanie osobników w pierwszym pokoleniu może być ujemne. Przystosowanie jest reprezentowane przez zmodyfikowaną funkcję celu h_k . W przypadku uwzględnienia ograniczeń z wykorzystaniem funkcji kary dla osobników znajdujących się daleko od obszaru dopuszczalnego w przestrzeni rozpatrywanego zadania, wartości kary mogą przekroczyć wartość pierwotnej funkcji celu. Bezpośrednie zastosowanie funkcji kary do algorytmu genetycznego może prowadzić do błędów w działaniu programu. **Wykazano, że konieczna jest modyfikacja funkcji kary zewnętrznej w taki**

sposób by zmodyfikowana funkcja celu miała zawsze wartość dodatnią. Rozwiązaniem tego problemu jest transformacja funkcji kary za pomocą funkcji sigmoidalnej. Zmodyfikowana funkcja celu ma postać:

$$h_k(\mathbf{x}) = f_k(\mathbf{x})e^{-\chi_k(\mathbf{x})} = \kappa_k(\mathbf{x})f_k(\mathbf{x}), \quad (7)$$

gdzie: χ_k – bezwymiarowa kara zewnętrzna, f_k – pierwotna funkcja celu.

Bezwymiarowy współczynnik $\kappa(\mathbf{x})$ reprezentuje karę za niespełnienie ograniczeń. Zmniejsza on pierwotną maksymalizowaną funkcję celu $f_k(\mathbf{x})$. Gdy kara dąży do zera (to znaczy, że obiekt spełnia wszystkie ograniczenia), to współczynnik $\kappa(\mathbf{x})$ rośnie do jedności.

Badania symulacyjne, przy wykorzystaniu funkcji analitycznych wykazały, że rozwiązanie optymalne uzyskiwano po wykonaniu 17 – 20 iteracji procedury optymalizacji. Autor wniosku wykonał serię obliczeń optymalizacyjnych wykorzystując połowy model opisujący zjawiska w aktuatorze elektromagnetycznym. W przypadku aktuatora rozwiązanie optymalne osiągnięto po około 15 pokoleniach algorytmu genetycznego. **Zaproponowana przez Habilitanta metoda adaptacji pozwala na uzyskanie optymalnego wyniku kilkakrotnie szybciej niż klasyczna metoda funkcji kary zewnętrznej, a nawet szybciej niż proponowana wcześniej modyfikacja [A2].**

4.3.3. Algorytm szarych wilków [A5]

Model matematyczny metody szarych wilków (ang. Gray Wolf Optimizer – GWO) został opracowany na podstawie obserwacji watah wilków polujących na większe ssaki. W stadach wilków obserwowany jest rozbudowany system rang społecznych (hierarchia), które decydują o pozycji każdego osobnika w grupie. Liderem grupy wilków jest osobnik α (osobnik o najlepszym przystosowaniu). Bardzo ważną rolę w funkcjonowaniu watahy pełni osobnik β . Jest to osobnik, który ustępuje tylko osobnikowi α , ale jest na wyższym poziomie od pozostałych osobników tworzących watahę. Trzeci poziom hierarchii grupy tworzą osobniki δ zaś pozostali członkowie stada – osobniki ω znajdują się najniżej w hierarchii stada.

W numerycznym odwzorowaniu metody szarych wilków wykorzystywane są **tylko wektory położeń \mathbf{x}** wszystkich osobników tworzących watahę.

Kandydat opracował własną procedurę optymalizacji na podstawie metody szarych wilków. Podczas wyznaczania położeń wszystkich osobników ω w kolejnej iteracji (k) algorytmu wykorzystywane są informacje o położeniu lidera – osobnik α , pierwszego alternatywnego lidera – osobnik β oraz drugiego alternatywnego lidera – osobnik δ . Ponadto wykorzystywane są dwa współczynniki liczbowe A i C . W każdej iteracji wartości parametrów A i C są obliczane następująco:

$$A_k = 2b_k r_2; C_k = b_k r_1, \quad (8)$$

przy czym: r_1, r_2 – liczby losowe z przedziału $(0, 1)$, b – współczynnik określający możliwość migracji wilków w obszarze rozwiązywanego zadania optymalizacji.

W przypadku dużej wartości parametru b osobniki mogą swobodnie przemieszczać się w obszarze rozpatrywanego zadania optymalizacji. Algorytm jest wówczas algorytmem poszukiwań globalnych. Mała wartość parametru b sprawia, że wilki są mniej „mobilne”, a algorytm staje się algorytmem poszukiwań lokalnych. W klasycznym opisie metody, autorzy proponują by współczynnik b przyjmowany był z zakresu $(0, 2)$ [25].

Autor wykazał, że odpowiedni dobór wartości parametru b jest ważny w przypadku wykonywania optymalizacji obiektów opisanych za pomocą polowych modeli [26]. Wartość parametru b w kolejnych iteracjach ma istotny wpływ na efektywność procedury optymalizacyjnej. Dlatego Autor przeprowadził badania dotyczące odpowiedniego doboru tego współczynnika. Przeprowadzone przez Habilitanta obliczenia wykazały [A5], że możliwe jest polepszenie efektywności algorytmu przez przyjęcie wartości parametru b zmienianej w każdej iteracji, obliczanej następująco:

$$b_k = 0.97 + 5e^{-k}, \quad (9)$$

gdzie: k – numer iteracji algorytmu optymalizacji.

Opracowana procedura optymalizacji zawierająca zmodyfikowaną metodę szarych wilków została przystosowana przez Autora do optymalizacji z ograniczeniami silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim. Rozpatrywane zadanie syntezy polegało na optymalizacji parametrów struktury wirnika. Struktura wirnika została opisana za pomocą trzech zmiennych decyzyjnych.

Wykonane zostały obliczenia optymalizacyjne dla opracowanej przez Habilitanta procedury zawierającej zmodyfikowaną metodę GWO. Wyniki obliczeń porównano z wynikami obliczeń uzyskiwanymi dla: algorytmu genetycznego, klasycznej metody roju cząstek oraz algorytmu nietoperzy [A1].

Zaproponowany przez Habilitanta algorytm charakteryzował się lepszą efektywnością niż pozostałe analizowane procedury optymalizacji. Wszystkie analizowane procedury optymalizacyjne zostały uruchomione 12 razy, wyznaczone zostały wartości odchylenia standardowego oraz określony całkowity czas obliczeń. Wyniki przedstawiono w Tabeli 1. W kolejnych wierszach tabeli przedstawiono: najlepszy oraz najgorszy wynik (pod względem wartości funkcji celu) uzyskany podczas serii obliczeń, średnią wartość funkcji celu, odchylenie standardowe oraz średni czas obliczeń.

Algorytm szarych wilków charakteryzuje się dobrą zbieżnością. **Jest jedynym spośród badanych przez Habilitanta algorytmów, w których do wyznaczenia kolejnych położeń osobników wykorzystywane są informacje o współrzędnych lidera oraz współrzędnych dwóch alternatywnych liderów.**

Tabela 1. Wyniki obliczeń symulacyjnych

Algorytm	Najlepszy wynik	Najgorszy wynik	Średnia	Odchylenie standardowe	Czas obliczeń
GWO	3,516157	3,490543	3,501622	0,009157	116 h
PSO	3,510914	3,456814	3,490405	0,017013	132 h
BA	3,517136	3,426121	3,488883	0,025126	132 h
GA	3,518801	3,476884	3,501936	0,015807	195 h

Przyjęte ograniczenia w przypadku metody szarych wilków, można uwzględnić wykorzystując metodę funkcji kary zewnętrznej. **W przypadku metody GWO Habilitant zaleca zmianę współczynnika kary w przedziale od 4 do 8 iteracji metody szarych wilków.**

4.3.4. Algorytm poszukiwania kukułczego [A6]

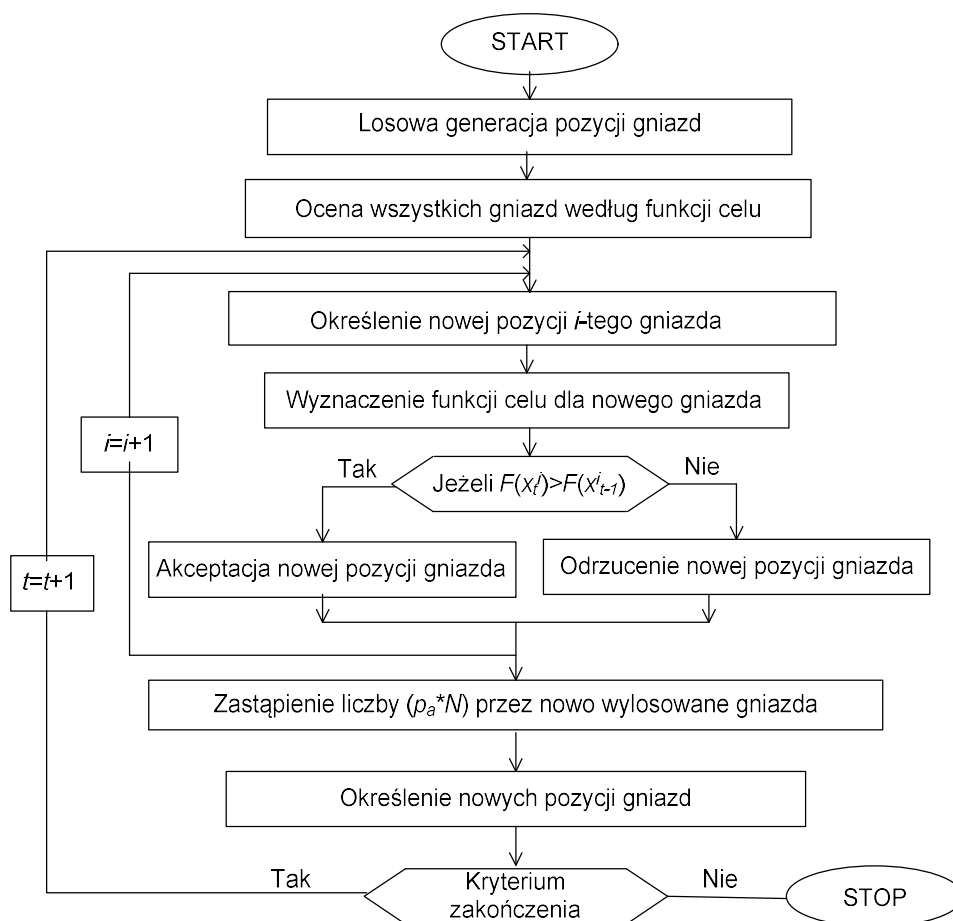
Metoda poszukiwania kukułczego [28] (ang. Cuckoo Search – CS) została opracowana w 2009 roku [29]. Odwzorowuje ona zachowanie lęgowe kukułki zwyczajnej. Kukułka jest drapieżnikiem rozrodczym. Swoje jaja podrzuca do gniazd innych ptaków, których jaja są zbliżone rozmiarami i kolorystyką do jaj kukułki zwyczajnej.

W metodzie poszukiwania kukułczego posługujemy się określeniami: kukułka, gniazdo oraz jajo. Gniazdo oznacza lokalizację, w której może znaleźć się potencjalne rozwiązanie – czyli jajo. A kolejne jaja są rozmieszczane przez kukułki w gniazdach. Pojedyncza iteracja algorytmu optymalizacji polega na rozmieszczeniu przez określoną liczbę kukułek jaj w dostępnych gniazdach. Schemat blokowy algorytmu kukułki przedstawiono na rysunku 5.

Habilitant opracował procedurę optymalizacji zawierającą metodę poszukiwania kukułczego [A6]. Autor wniosku wykonał serię obliczeń optymalizacyjnych testowej funkcji analitycznej stosując metodę poszukiwania kukułczego oraz metodę roju cząstek. Porównano najlepszą i najgorszą wartość funkcji celu uzyskaną podczas obliczeń, średnią wartość funkcji celu oraz odchylenie standardowe. Wyniki obliczeń zestawiono w Tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie wyników obliczeń dla metody poszukiwania kukułczego oraz metody roju cząstek

Algorytm	Najlepszy wynik	Najgorszy wynik	Średnia	Odchylenie standardowe
CS	0,002914	0,041602	0,058439	0,010225
PSO	0,004196	0,097256	0,081736	0,092668



Rys. 5. Schemat blokowy algorytmu kukułczego

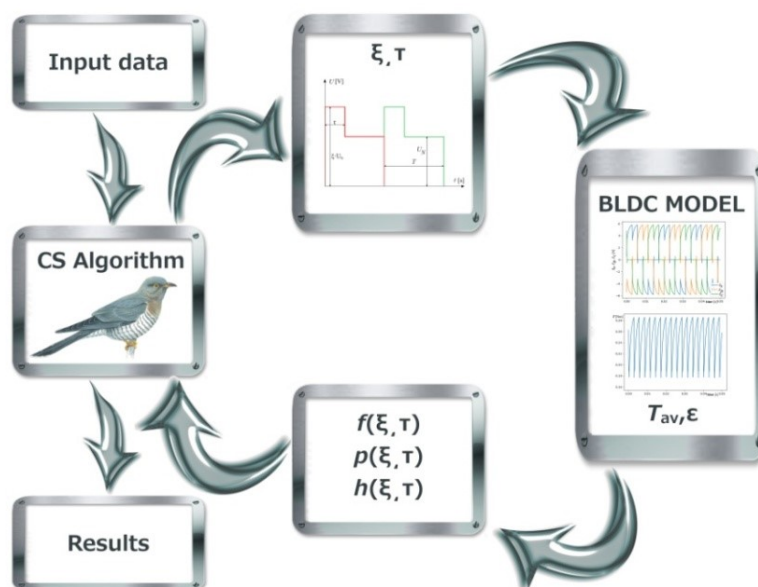
Opracowany przez Habilitanta algorytm optymalizacyjny zawierający metodę poszukiwania kukułczego charakteryzuje się lepszym prawdopodobieństwem znalezienia ekstremum globalnego niż klasyczna metoda roju cząstek.

Habilitant opracował oprogramowanie do optymalizacji parametrów funkcjonalnych bezszczotkowego silnika prądu stałego wykorzystujące procedurę optymalizacyjną zawierającą metodę kukułki oraz model zastępczy silnika BLDC. Schemat blokowy oprogramowania przedstawiono na rysunku 6.

Zadanie optymalizacji polegało na doborze dwóch parametrów określających kształt napięcia zasilającego silnik, które zapewniały maksymalną wartość średniego momentu elektromagnetycznego przy zadanej wartości tętnień momentu. Ograniczenie zostało uwzględnione przy wykorzystaniu funkcji kary statycznej (niezmiennej w trakcie trwania procesu optymalizacji).

Autor wniosku wykonał serię obliczeń optymalizacyjnych w celu dopasowania metody poszukiwania kukułczego do optymalizacji z uwzględnieniem ograniczeń metodą kary statycznej. W przypadku zastosowania statycznej funkcji kary, bardzo ważny jest prawidłowy dobór współczynnika γ . Habilitant wykazał, że w przypadku metody kukułki dobranie zbyt dużej wartości tego współczynnika powoduje „utknięcie” procedury

optymalizacyjnej w punkcie ekstremum lokalnego, zaś przyjęcie zbyt małej wartości współczynnika γ prowadziło do uzyskania wyniku, w którym nie zawsze uzyskiwana była dopuszczalna wartość tętnień momentu. **Dlatego Autor zaleca przyjęcie wartości współczynnika γ dobranego do projektowanego przetwornika elektromagnetycznego.**



Rys. 6. Schemat blokowy oprogramowania do optymalizacji silników BLDC

Habilitant wykonał obliczenia optymalizacyjne dla dwóch zadanych wartości współczynnika tętnień momentu ϵ (5 % oraz 22 %). **Obliczenia wykazały, że przystosowanie algorytmu poszukiwania kukułczego poprzez zastosowanie funkcji kary statycznej pozwala na osiągnięcie dobrej efektywności algorytmu.** W wyniku procesu optymalizacji wynik optymalny uzyskano po wykonaniu 4-ch iteracji algorytmu optymalizacji dla łagodniejszego ograniczenia ($\epsilon = 20\%$) oraz po wykonaniu 6-ciu iteracji dla ograniczenia bardziej restrykcyjnego ($\epsilon = 5\%$).

4.3.5. Algorytm salpów [A8]

Algorytm salpów (ang. Salp Swarm Algorithm – SSA) jest zaliczany do metod inteligencji roju. Opracowany został w 2017 roku. W środowisku naturalnym salpy (należące do gromady sprzągli) tworzą duże kolonie, które poruszają się tworząc łańcuch podążający za liderem (najlepiej przystosowany osobnik).

Habilitant opracował autorską procedurę optymalizacyjną wykorzystując metodę salpów. Autor zaproponował modyfikację klasycznej metody poprzez podział populacji na grupę liderów oraz na grupę osobników podążających za liderami. Efektywność zmodyfikowanej metody testowana była przy wykorzystaniu funkcji analitycznych. Przeprowadzone obliczenia symulacyjne wykazały, że opracowana metoda pozwala na uzyskanie lepszych wartości odchyień standardowych niż metoda roju cząstek oraz algorytmy genetyczne. **Proponowana**

modyfikacja poprawia efektywność algorytmu optymalizacji oraz zwiększa prawdopodobieństwo znalezienie ekstremum globalnego przy pojedynczym wykonaniu algorytmu. Takie cechy są pożądane w przypadku optymalizacji przetworników elektromagnetycznych opisanych polowymi modelami zjawisk.

Szczegółowa analiza rozmieszczenia kolonii salpów oraz roju cząstek wykazała, że obie metody różnią się przebiegiem procesu optymalizacji. W metodzie PSO obserwujemy silne zjawisko skupiania się cząstek w pobliżu lidera roju. W przypadku metody salpów, przez pierwsze osiem do dziesięciu iteracji salpy przeszukują obszar dopuszczalny i dopiero w kolejnych iteracjach następuje proces skupiania salpów wokół najlepszego lidera.

W metodzie SSA funkcja kary zewnętrznej może być bezpośrednio zastosowana do uwzględnienia ograniczeń. Habilitant wykazał, że istotne jest przyjęcie odpowiedniej wartości współczynnika kary oraz liczby zewnętrznych iteracji metody związanych z narastaniem kary.

W przypadku metody salpów Autor wniosku zaleca przyjęcie podstawy współczynnika kary (a) z zakresu (1,15 – 1,35). Współczynnik kary (wagi) (a^k) należy zmieniać po wykonaniu czterech lub pięciu iteracji metody salpów. Takie przyjęcie powyższych parametrów zapewnia dobrą efektywność algorytmu optymalizacji. Habilitant wykazał, że zbyt szybkie zmiany współczynnika kary, tak jak w przypadku metody PSO mogą prowadzić do utknięcia procedury w punkcie ekstremum lokalnego [30].

Opracowaną procedurę Habilitant zastosował do optymalizacji bezszczotkowego silnika prądu stałego. Optymalizowany obiekt został opisany za pomocą czterech zmiennych decyzyjnych. Wykonano serię obliczeń wykorzystując połowo-obwodowy model silnika BLDC. Wynik optymalny uzyskano po wykonaniu dwudziestu iteracji zastosowanego algorytmu.

Podsumowanie

Prowadzone przez Autora wniosku prace naukowe skoncentrowane były na adaptacji i modyfikacji algorytmów niedeterministycznych do rozwiązywania zadań projektowania urządzeń elektromagnetycznych. Szczególnie trudna jest adaptacja badanych metod do optymalizacji z uwzględnieniem ograniczeń. **W celu osiągnięcia jak najlepszej efektywności Habilitant zaleca przyjmowanie różnych metod adaptacji w zależności od wybranego algorytmu optymalizacji.**

Do najważniejszych osiągnięć dotyczących adaptacji algorytmów do uwzględniania ograniczeń w procesie optymalizacji Habilitant zalicza:

- opracowanie procedury optymalizacyjnej wykorzystującej metodę wzorowaną na echolokacyjnym zachowaniu nietoperzy, przystosowanie metody do uwzględnienia ograniczeń metodą funkcji kary zewnętrznej,

- opracowanie modyfikacji algorytmu genetycznego, w której iteracje związane z zmianami kary oraz kolejne generacje algorytmu genetycznego wzajemnie się przenikają,
- opracowanie adaptacji algorytmu genetycznego do uwzględniania ograniczeń polegającą na zastosowaniu transformacji sigmoidalnej oraz zmiany współczynnika kary w każdym pokoleniu,
- opracowanie modyfikacji metody szarych wilków polegającej na zmianie współczynnika charakterystycznego metody (b) w każdej iteracji algorytmu optymalizacji,
- opracowanie procedury optymalizacyjnej wykorzystującej metodę poszukiwania kukułczego i jej adaptacja do uwzględnienia ograniczeń metodą kary statycznej,
- opracowanie modyfikacji metody salpów polegającej na podziale populacji na grupę liderów i osobników podążających oraz jej przystosowanie do uwzględnienia ograniczeń.

4.4. Zastosowanie metod optymalizacji do zadań optymalnego projektowania

4.4.1. Algorytm szarych wilków [A4]

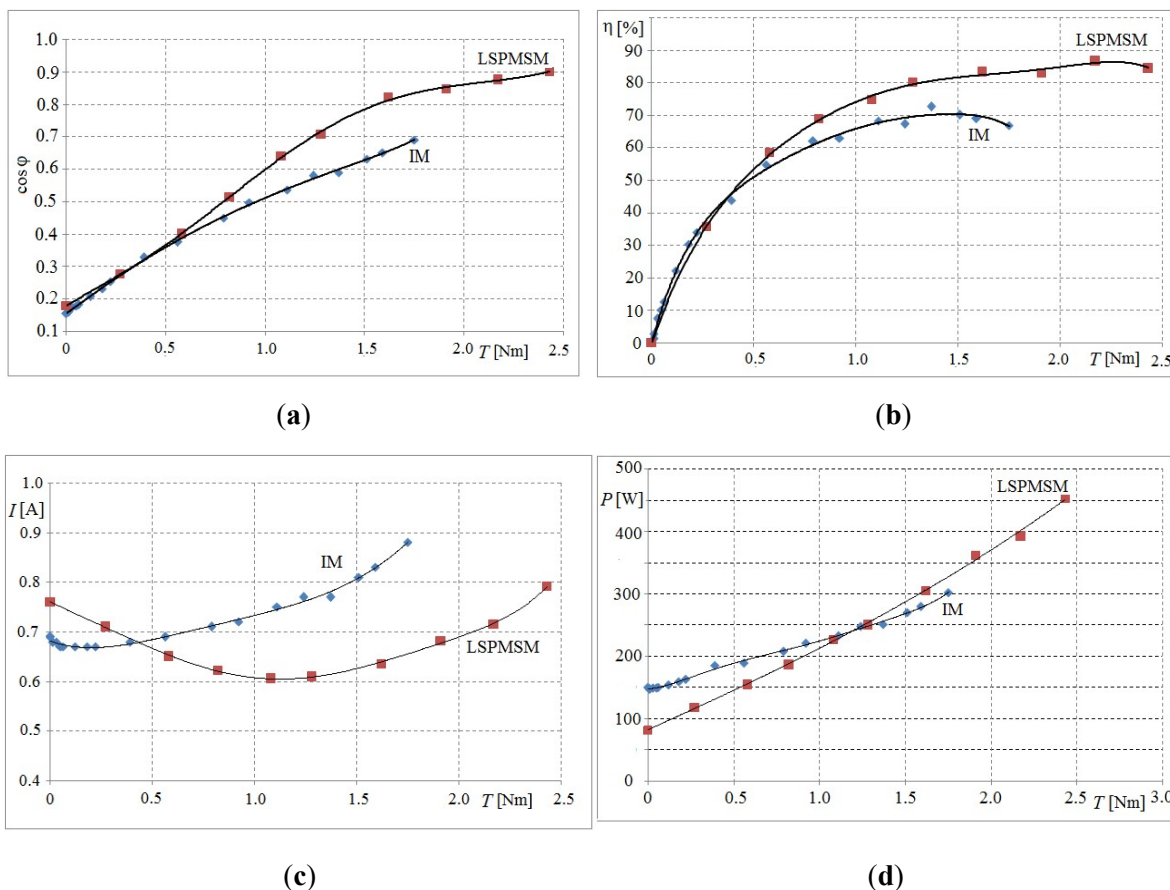
Habilitant przystosował metodę szarych wilków do optymalizacji wirnika silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim małej mocy. Zadanie optymalizacji polegało na takim doborze parametrów strukturalnych układu wzbudzenia, aby silnik charakteryzował jak najlepszymi parametrami funkcjonalnymi w stanie ustalonym (sprawność oraz współczynnik mocy). W przypadku projektowania silników LSPMSM należy pamiętać, że bardzo ważna jest skuteczna synchronizacja po uruchomieniu bezpośrednio z trójfazowej sieci zasilającej. **Dlatego Autor zaproponował uwzględnienie współczynnika χ charakteryzującego właściwości samodzielnego rozruchu. Jeżeli, osobnik (wilk), czyli wariant silnika, nie osiągnął prędkości synchronicznej podczas rozruchu wartość funkcji celu była pomniejszana o 90%.**

Optymalizowany wirnik został opisany za pomocą czterech parametrów strukturalnych. **Habilitant wykonał serię obliczeń optymalizacyjnych dla watahy wilków liczącej 38 osobników. Wynik zbliżony do optymalnego uzyskano po wykonaniu pięciu iteracji algorytmu optymalizacji.**

Wykonany został prototyp silnika LSPMSM, w którym wykorzystano elementy seryjnie produkowanego silnika indukcyjnego o wirniku klatkowym mocy 250 W. Wymiary parametrów strukturalnych prototypu wyznaczono przy wykorzystaniu procedury optymalizacji. Zbudowano stanowisko do badania charakterystyk prototypu.

Autor wnioski wyznaczył eksperymentalnie charakterystyki mechaniczne prototypu silnika. Wyniki pomiarów zostały porównane z wynikami pomiarów dla bazowego silnika indukcyjnego. Porównanie charakterystyk ilustruje rysunek 7.

Zaprojektowany prototyp ma lepsze wartości współczynnika mocy i sprawności w całym badanym zakresie niż bazowy silnik indukcyjny. Silnik LSPMSM pobiera większy prąd na biegu jałowym, co jest związane ze zwiększeniem zastępczej szczeliny powietrznej poprzez montaż magnesów w otworach wydrążonych w jarmie wirnika.



Rys. 7. Charakterystyki prototypu silnika (LSPMSM) oraz silnika indukcyjnego (IM),
 a) charakterystyka współczynnika mocy, b) charakterystyka sprawności,
 c) charakterystyka prądu przewodowego pobieranego przez silnik,
 d) charakterystyka mocy elektrycznej pobieranej z sieci

Habilitant porównał parametry bazowego silnika indukcyjnego oraz prototypu wykonanego wykorzystując wyniki uzyskane podczas optymalizacji. Wyniki porównania zestawiono w Tabeli 3.

Tabela 3. Porównanie parametrów silników przy obciążeniu momentem znamionowym

Parametr	IM	LSPMSM
$\cos\varphi$ [-]	0.690	0.847
η [%]	66.766	84.931
I [A]	0.861	0.682
n [rpm]	1378	1500

Na podstawie wyników pomiarów eksperymentalnych można stwierdzić, że wprowadzenie zmian konstrukcyjnych w wirniku silnika skutkuje poprawą współczynnika mocy o 23% oraz poprawą sprawności o 27%.

Autor wykazał, że procedury optymalizacyjne w sposób skuteczny mogą wspomagać proces projektowania przetworników elektromagnetycznych. W wyniku procesu optymalizacji można poprawiać parametry funkcjonalne urządzenia lub opracować wytyczne do projektowania nowych struktur przetworników elektromagnetycznych.

4.4.2. Algorytm genetyczny [A9]

Autor zastosował algorytm genetyczny do wielokryterialnej optymalizacji silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim, który może zastąpić silnik indukcyjny zapewniający obrót w żurawiu wieżowym. Strukturę projektowanego silnika opisano przy wykorzystaniu dziewięciu zmiennych decyzyjnych, opisujących strukturę stojana i wirnika.

Przyjęta funkcja celu uwzględniała następujące parametry silnika: sprawność, współczynnik mocy oraz masę materiałów magnetycznych. Należy zauważyć, że maszyny LSPMSM muszą charakteryzować się skuteczną synchronizacją. Najnowsze wyniki badań publikowane w literaturze światowej wykazały, że uwzględnianie w funkcji celu wyłącznie parametrów w stanie ustalonym powodują pogorszenie parametrów w stanie rozruchu, w tym zdolności do synchronizacji [31]. **Dlatego Habilitant dokonał modyfikacji procedury inicjacji algorytmu genetycznego, w celu przystosowania go do optymalizacji silnika LSPMSM. Zmodyfikowana procedura inicjacji polegała na utworzeniu takiego pokolenia startowego, w którym co najmniej połowa osobników (maszyn) charakteryzowała się skuteczną synchronizacją.** Testy procedury optymalizacyjnej wykazały, że zastosowanie zmodyfikowanej procedury inicjacji nie gwarantuje uzyskania optymalnej maszyny mającej skuteczną synchronizację. **Autor wprowadził kolejną modyfikację algorytmu genetycznego, polegającą na przeprowadzeniu obliczeń w stanie przejściowym dla każdego osobnika, który w procesie optymalizacji osiągnął lepszą wartość funkcji celu niż najlepiej przystosowany osobnik w aktualnym pokoleniu.** Jeżeli „kandydujący” lider osiągnął prędkość synchroniczną stawał się liderem populacji, zaś w przypadku braku skutecznej synchronizacji jego funkcję celu pomniejszano o 70%. **Takie obniżenie wartości funkcji celu powodowało, że w kolejnym pokoleniu osobnik z dużym prawdopodobieństwem eliminowany był w operatorze reprodukcji.**

W tak opracowanym algorytmie optymalizacji do wyznaczenia wartości funkcji celu w procesie inicjacji konieczne jest wyznaczenie parametrów funkcjonalnych silnika w stanie ustalonym oraz podczas rozruchu dla wszystkich osobników. Połowa osobników tworzących populację startową musi charakteryzować się skuteczną synchronizacją. Zatem zaproponowana przez Habilitanta procedura inicjacji jest znacznie bardziej czasochłonna, niż procedura

inicjacji klasycznego algorytmu genetycznego. **Jednak w kolejnych iteracjach (generacjach) procesu optymalizacji do wyznaczenia funkcji celu dla każdego osobnika rozwiązywany jest model tylko w stanie ustalonym.** Natomiast, model w stanie przejściowym jest rozwiązywany tylko dla tych osobników, dla których osiągnięta wartość funkcji celu jest wyższa niż wartość funkcji celu najlepiej przystosowanego osobnika. **Tak opracowana procedura optymalizacji pozwoliła na skrócenie całkowitego czasu trwania procesu optymalizacji, a uzyskany optymalny osobnik (silnik LSPMSM) charakteryzował się skuteczną synchronizacją.**

Autor wykonał serię obliczeń optymalizacyjnych dla silnika synchronicznego o rozruchu własnym o mocy znamionowej 4 kW. W wyniku tego procesu otrzymano silnik o następujących parametrach: sprawność 89,39% oraz współczynnik mocy 0,985.

Podsumowanie

Autor opracował szereg modyfikacji umożliwiających adaptację metod niedeterministycznych do optymalnego projektowania wybranych maszyn elektrycznych. Do najważniejszych osiągnięć w tym obszarze badań Habilitant zalicza:

- adaptację metody szarych wilków do optymalizacji wirnika silnika synchronicznego o rozruchu własnym,
- opracowanie modyfikacji algorytmu genetycznego umożliwiającą efektywną optymalizację struktury silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim.

4.5. Porównanie efektywności wybranych algorytmów [A7]

Rozwój algorytmów niedeterministycznych obserwujemy od około pięćdziesięciu lat. Od momentu powstania pierwszych algorytmów z tej grupy, tj. algorytmów genetycznych oraz metody roju cząstek naukowcy dążyli do opracowania bardziej efektywnych metod zapewniających lepszą zbieżność i powtarzalność przy pojedynczym wykonaniu procedury optymalizacyjnej oraz jednocześnie większą dokładność. Metody niedeterministyczne mogą w sposób efektywny współpracować z polowymi modelami (sprzężonymi polowo-obwodowym modelami) zjawisk w projektowanym urządzeniu elektromagnetycznym.

Autor wniosku prowadził badania nad zastosowaniem klasycznych niedeterministycznych metod optymalizacji (algorytmy genetyczne oraz metoda roju cząstek) już w trakcie badań podczas realizacji doktoratu. Jednak w miarę rozwoju tego typu metod były one coraz częściej stosowane do optymalizacji przetworników elektromagnetycznych [32, 33]. Poszczególne algorytmy różnią się pomiędzy sobą właściwościami.

Habilitant przeprowadził badania właściwości wybranych metod przy wykorzystaniu testowych funkcji analitycznych oraz przetwornika opisanego polowym-obwodowym modelem zjawisk elektromagnetycznych.

W pracy [A7] Autor wniosku analizował wybrane algorytmy optymalizacji, tj. algorytmy genetyczne, metodę roju cząstek, metodę wzorowaną na echolokacyjnym zachowaniu nietoperzy, metodę poszukiwania kukułczego oraz metodę OBI – metodę opracowaną przez Habilitanta.

Autor wykonał obliczenia dla dwóch analitycznych funkcji testowych: funkcji Rosenbrocka oraz funkcji Himmelblau. Dla każdej analizowanej funkcji proces optymalizacji powtórzono 20 razy. Analizowano stada o liczebności 50 osobników. Wszystkie współczynniki procedur optymalizacyjnych dobrano na podstawie doświadczenia własnego Habilitanta. Wszystkie badane procedury wyznaczyły punkt w pobliżu ekstremum globalnego. Procedury różniły się liczbą obliczeń funkcji celu. Dla obu analizowanych funkcji analitycznych najgorsze wyniki uzyskano dla algorytmu wzorowanego na echolokacyjnym zachowaniu nietoperzy, a najlepsze – dla metod PSO oraz AG. Najmniejsze wartości odchyień standardowych uzyskano dla metody roju cząstek oraz metody poszukiwania kukułczego.

Efektywność algorytmów Autor badał rozwiązując zadanie optymalizacji polegające na doborze parametrów układu wzbudzenia oraz liczby zwojów stojana silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim. Optymalizacja silnika LSPMSM jest zadaniem trudnym, ponieważ należy uwzględnić parametry projektowanego silnika w stanie ustalonym oraz parametry w stanie przejściowym – podczas asynchronicznego rozruchu silnika. **Habilitant wykazał, że w kompromisowej funkcji celu należy uwzględnić parametry funkcjonalne silnika w stanie ustalonym (sprawność oraz współczynnik mocy) oraz parametry w stanie przejściowym (moment rozruchowy oraz parametr odpowiadający za skuteczną synchronizację).**

W przypadku optymalizacji silnika LSPMSM Autor wykonał obliczenia symulacyjne dla czterech badanych metod optymalizacji. W rozważaniach pominięto algorytm nietoperzy dla którego uzyskiwano najgorsze wyniki podczas badań przy wykorzystaniu funkcji analitycznych. Na podstawie serii wykonanych obliczeń optymalizacyjnych można stwierdzić, że parametry optymalne w stanie ustalonym uzyskane w wyniku zastosowania każdej z metod mają zbliżone wartości. Parametry rozruchowe zależą od zastosowanej metody.

Na podstawie wykonanych badań Habilitant wykazał, że większość metod pozwala na znalezienie ekstremum globalnego. Poszczególne algorytmy różnią się pomiędzy sobą efektywnością oraz czasochłonnością obliczeń, wynikającą z liczby obliczeń funkcji celu. Autor zaleca dobór metody optymalizacji w zależności od zastosowanego modelu projektowanego urządzenia. Po wyborze algorytmu konieczne jest odpowiednie dobranie współczynników liczbowych charakteryzujących poszczególne metody optymalizacji.

4.6. Opracowanie nowych ujęć metod optymalizacji [A7], [A10]

Autor wniosku w swoich badaniach naukowych oprócz prac nad adaptacją i modyfikacją wybranych algorytmów niedeterministycznych do rozwiązania zadań optymalnej syntezy przetworników elektromagnetycznych, prowadził również badania nad możliwością opracowania nowych metod optymalizacji. **W wyniku realizowanych prac naukowych Habilitant opracował dwie nowe metody optymalizacji: hybrydową metodę poszukiwania kukulczego oraz metodę OBI.**

Metoda OBI (ang. Only Best Individual) [A7] podczas wyznaczania kolejnych położenia osobników w k -tej iteracji uwzględnia tylko położenie lidera (najlepiej przystosowanego osobnika). Takie podejście może doprowadzić procedurę optymalizacji do utknięcia w punkcie ekstremum lokalnego. W celu zwiększenia prawdopodobieństwa znalezienia ekstremum globalnego Autor wprowadził współczynnik a_k , który w początkowych iteracjach przyjmuje większe wartości, a w kolejnych iteracjach zmniejsza się do zadeklarowanej wartości stałej. Położenie j -tego osobnika w k -tej iteracji jest wyznaczane:

$$\mathbf{x}_k^j = \mathbf{x}_{k-1}^j + r_1 a_k (\mathbf{x}_{k-1}^j - \mathbf{x}_B), \quad (10)$$

gdzie: r_1 – liczba losowa z przedziału $(0, 1)$, \mathbf{x}_B – wektor położenia lidera.

Dla zwiększenia efektywności metody w każdej k -tej iteracji tworzone jest N_N nowych osobników, których położenie wyznacza się według równania:

$$\mathbf{x}_k^j = \mathbf{x}_r + r_2 b (\mathbf{x}_r - \mathbf{x}_B), \quad (11)$$

przy czym: \mathbf{x}_r – wektor współrzędnych osobnika tworzonego losowo, r_2 – współczynnik losowy z przedziału $(0, 1)$, b – współczynnik liczbowy metody, \mathbf{x}_B – wektor określający położenie lidera.

Po zakończeniu każdej iteracji algorytmu liczba N_N najgorzej przystosowanych osobników jest eliminowana. **Tak opracowany algorytm pozwalał na osiągnięcie zbliżonych efektywności do innych powszechnie stosowanych niedeterministycznych metod optymalizacji.** Przed zastosowaniem metody OBI do optymalizacji obiektów technicznych Autor zaleca odpowiednie dobranie funkcji opisującej zmiany współczynnika b (zależność 10) do rozwiązywanego problemu optymalizacyjnego. Nieodpowiednie dobranie funkcji zmian współczynnika może prowadzić do pogorszenia efektywności algorytmu optymalizacji.

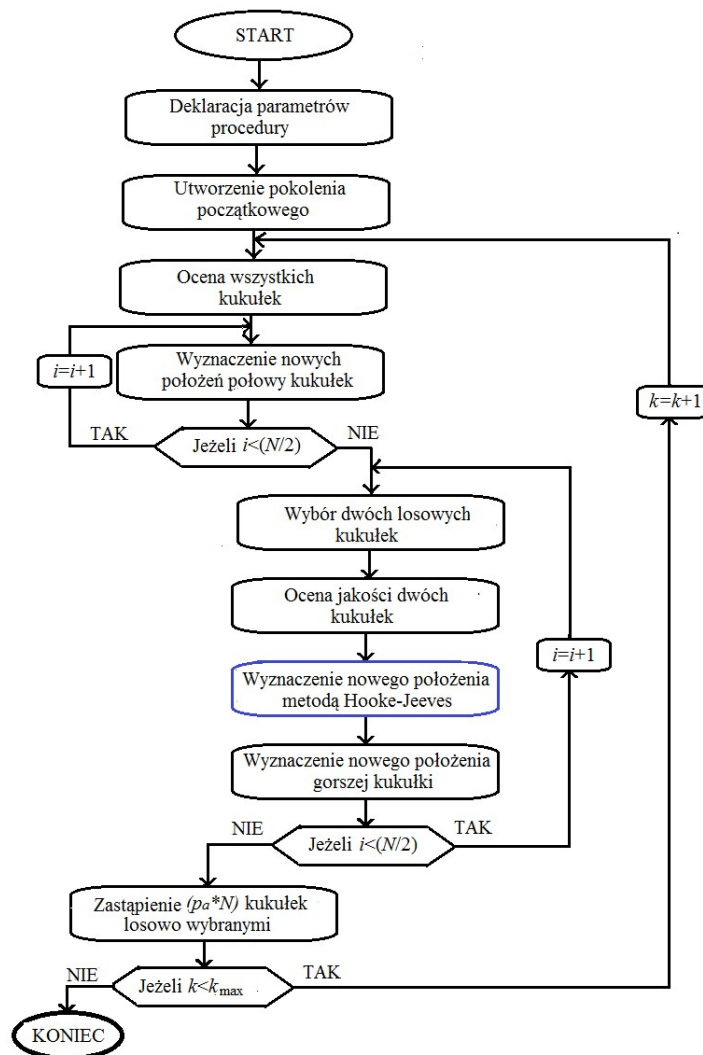
Habilitant opracował hybrydową metodę optymalizacji będącą połączeniem metody niedeterministycznej (metoda poszukiwania kukulczego) oraz metody deterministycznej (metoda Hooka-Jevesa).

W proponowanej hybrydowej metodzie optymalizacji Autor zmodyfikował nazewnictwo stosowane w klasycznej metodzie poszukiwania kukulczego. W hybrydowej metodzie kukułka (wariant projektowanego urządzenia)

reprezentowała położenie osobnika w obszarze dopuszczalnym rozwiązywanego zadania. Schemat blokowy opracowanej metody przedstawiono na rysunku 8.

Dla połowy kukulek stanowiących populację w k -tej iteracji nowe położenia wyznaczane są przy wykorzystaniu klasycznej metody poszukiwania kukułczego [A6]. Następnie $N/2$ razy wybieramy dwie losowe kukułki, gdzie N jest liczbą kukulek w populacji. Dla dwóch losowo wybranych kukulek porównywane są wartości funkcji celu. Wykorzystując metodę Hooka-Jevesa poszukiwane jest najlepsze położenie kukułki o niższym przystosowaniu w kierunku lepiej zorientowanej (o większej wartości funkcji celu) kukułki.

Kandydat opracował procedurę optymalizacyjną zawierającą hybrydową metodę poszukiwania kukułczego. W celu oceny właściwości proponowanego podejścia Autor przeprowadził obliczenia symulacyjne dla dwóch funkcji testowych. Wykonano serię dwudziestu procesów obliczeniowych procedury optymalizacyjnej. **Na podstawie analizy wyników obliczeń Habilitant wykazał, że hybrydowa metoda pozwala na uzyskanie wyniku optymalnego o dużej dokładności.** Wadą metody jest większa ilość obliczeń funkcji celu.



Rys. 8. Schemat blokowy hybrydowej metody poszukiwania kukułczego

Autor porównał krzywe zbieżności dla procesu optymalizacji, dla którego otrzymano najlepszy wynik spośród wszystkich uruchomień. **Wykazano, że opracowana przez Habilitanta hybrydowa metoda poszukiwania kukułczego jest skuteczna w poszukiwaniu ekstremum globalnego.** Opracowana metoda charakteryzuje się dużą powtarzalnością dla losowego położenia kukulek podczas inicjacji algorytmu.

Opracowana procedura optymalizacyjna została połączona z modelem matematycznym silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim. Celem optymalizacji było wyznaczenie parametrów struktury wirnika zapewniające jak najlepsze parametry eksploatacyjne silnika. Wymiary geometryczne stojana przyjęte zostały na podstawie wyników przedstawionych w pracy [A9]. W wielokryterialnej funkcji celu uwzględniono: sprawność, współczynnik mocy oraz parametr odpowiedzialny za skuteczną synchronizację optymalizowanego silnika.

Na podstawie zrealizowanych badań Autor wykazał, że hybrydowa metoda poszukiwania kukułczego pozwala na osiągnięcie dokładniejszego wyniku niż wynik uzyskiwany z wykorzystaniem klasycznej metody poszukiwania kukułczego. **Hybrydowa metoda kukułki może być z powodzeniem stosowana do wielokryterialnej optymalizacji urządzeń elektromagnetycznych.** Jediną wadą, która może ograniczać zastosowanie metody jest większa liczba obliczeń funkcji celu. **Dlatego zdaniem Autora metoda powinna być stosowana do obliczeń optymalizacyjnych, w których wymagane jest wyznaczenie rozwiązania optymalnego z dużą dokładnością.**

Podsumowanie

Przeważająca większość prowadzonych przez Autora badań skupiała się na adaptacji i modyfikacji metod niedeterministycznych do rozwiązywania zadań optymalnego projektowania urządzeń elektromagnetycznych. **Habilitant opracował własne metody optymalizacji, które mogą być skutecznie stosowane do optymalizacji urządzeń elektromagnetycznych.**

Do najważniejszych osiągnięć autora zalicza:

- opracowanie metody OBI,
- opracowanie hybrydowej metody poszukiwania kukułczego.

4.7 Podsumowanie

Prowadzone przez Habilitanta prace naukowe dotyczyły dwóch kierunków. W pierwszym nurcie Autor wniosku skupiał się na dostosowaniu matematycznych modeli zjawisk zachodzących w układach elektromagnetycznych (modeli polowych i modeli sprzężonych) do procedur optymalizacji. Drugi kierunek badań Habilitanta był ukierunkowany na adaptację, modyfikację oraz opracowanie nowych ujęć niedeterministycznych metod optymalizacji do rozwiązywania zadań optymalnego projektowania wybranych maszyn.

Do najważniejszych osiągnięć w głównym obszarze badań Autor wniosku zalicza:

- udział w opracowaniu polowo-obwodowego modelu aktuatora z rdzeniem magnetostrykcyjnym uwzględniającego dwa rodzaje nieliniowości [5],
- opracowanie i wdrożenie polowo-obwodowego modelu zjawisk elektromagnetycznych w bezszczotkowym silniku prądu stałego [A8],
- opracowanie polowo-obwodowego modelu aktuatora elektromagnetycznego [A3],
- opracowanie polowo-obwodowego modelu silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim [A4],
- opracowanie zastępczego modelu bezszczotkowego silnika prądu stałego [A6],
- opracowanie i wdrożenie procedury optymalizacyjnej wykorzystującej algorytm wzorowany na echolokacyjnym zachowaniu nietoperzy; zastosowanie algorytmu do optymalizacji z ograniczeniami silnika synchronicznego o rozruchu własnym [A1],
- opracowanie modyfikacji algorytmu generycznego, w której iteracje związane ze zmianami kary oraz kolejne pokolenia algorytmu genetycznego wzajemnie się przenikają [A2]; opracowana modyfikacja zacierá różnice pomiędzy zewnętrznymi iteracjami związanymi z narastaniem współczynnika kary, a iteracjami algorytmu,
- opracowanie adaptacji algorytmu genetycznego do uwzględniania ograniczeń polegającą na zastosowaniu transformacji sigmoidalnej oraz zmiany współczynnika kary w każdym pokoleniu (iteracji) [A3],
- opracowanie modyfikacji metody szarych wilków polegającej na zmianie współczynnika charakterystycznego metody w każdej iteracji algorytmu optymalizacji [A5]; modyfikacja metody poprawiająca zbieżność algorytmu optymalizacji,
- adaptacja oraz wdrożenie procedury optymalizacji wykorzystującej metodę poszukiwania kukułczego oraz zastosowanie jej do optymalizacji bezszczotkowego silnika prądu stałego z uwzględnieniem ograniczeń [A6],
- adaptacja metody salpów do uwzględnienia ograniczeń metodą kary zewnętrznej [A8],
- opracowanie modyfikacji metody salpów polegającej na podziale populacji na grupę liderów i osobników podążających [A8],
- opracowanie nowych metod optymalizacji [A9, A10],
- analiza efektywności wybranych niedeterministycznych metod optymalizacji [A5, A7],

- wykonanie obliczeń optymalizacyjnych synchronicznego silnika o rozruchu bezpośrednim oraz wykonanie prototypu silnika na podstawie wyników obliczeń optymalizacyjnych [A4],
- modyfikacja algorytmu genetycznego do optymalizacji silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim [A9].

Literatura

- [1] Ł. Knypiński, L. Nowak, *Field-circuit simulation of the outer rotor permanent magnet brushless DC motor taking nonlinearity into account*, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 34, pp. 309 – 317, 2010.
- [2] L. Nowak, Ł. Knypiński, K. Radziuk, *Optimization of the parameters of error actuated control system with electromagnetic actuator*, Przegląd Elektrotechniczny, No. 4, pp. 214 – 218, 2009.
- [3] Ł. Knypiński, L. Nowak, *Fidel-circuit simulation of the dynamics of the outer rotor permanent magnet brushless DC motor*, COMPEL, vol. 30, no. 2, pp.929 – 440, 2011.
- [4] Ł. Knypiński, L. Nowak, P. Sujka, K. Radziuk, *Application of a PSO algorithm for identification of the parameters of Jiles-Atherton hysteresis model*, Archives of Electrical Engineering, vol. 30, no. 2, pp. 139 – 148, 2012.
- [5] P. Idziak, K. Kowalski, L. Nowak, Ł. Knypiński, *FE transient analysis of magneostriptive actuator*, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, no. s1, Vol. 51, pp. S81-S87, 2016.
- [6] Ł. Knypiński, J. Krupiński, *The slewing drive system for tower crane with permanent magnet synchronous motor*, Archives of Electrical Engineering, vol. 70, no. 1, pp. 198 – 190, 2021.
- [7] B. Qu, Q. Yang, Y. Li, A. Sotelo, S. Ma, Z. Li, *A Novel Surface Inset Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicles*, Symmetry, vol. 12, no. 1, pp. 1 – 14, 2020.
- [8] G. Mao, M. Drack, M. Karami-Mosammam, D. Wirthl, T. Stockinger, R. Schwödiauer, M. Kaltenbrunner, *Soft electromagnetic actuators*, Science Advances, vol. 5, no. 26, pp. 1 – 24, 2020.
- [9] P. Di Barba, M. Bonislowski, R. Palka, P. Paplicki, M. Wardach, *Design of hybrid excited synchronous machine for electrical vehicles*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 8, pp. 1 – 6, 2015.
- [10] P. Premaratne, I. Jawad Kadhim, M. Qadim Abdullah, B. Halloran, P. J. Vial, *A survey on low-speed low power axial flux generator design and optimization using simulation*, Neurocomputing, vol. 509, no. 14, pp. 272 – 289, 2022.
- [11] P. R. Johansen, D. Patterson, C. O’Keefe, J. Swenson, *The use of an axial flux permanent magnet in-wheel direct drive in an electric bicycle*, Renewable Energy, vol. 22, no. 1–3, pp. 151 – 157, 2010.

- [12] C. Chu, R. Zhu, X. Jia, X. Zhang, *Design and Analysis of Giant Magnetostrictive Actuator*, IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications - AEECA, Dalian, China, 20-21 August 2022.
- [13] K. Liang, C. Li, Y. Tong, J. Fang, W. Zhong, *Design of a Low-Frequency Harmonic Rotary Piezoelectric Actuator*, *Actuators*, vol. 10, no. 4, pp. 1 – 18, 2021.
- [14] T. Anh Huynh, Min-Fu Hsieh, Kai-Jung Shih, Hsiu-Fu Kuo, *Design and analysis of permanent-magnet assisted synchronous reluctance motor*, Proceedings of the 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Sydney, Australia, 11-14 August 2017.
- [15] F. Wu, A. M. El-Refaie, *Permanent magnet Vernier machine: a review*, *Actuators*, vol. 13, on. 2, pp. 127 – 137, 2019.
- [16] Un-Jae Seo, Dong-Jun Kim, Pil-Wan Han, Yon-Do Chun, *FE-Aided Synchronization Analysis of Line-Start Synchronous Reluctance Motors*, *Applied Sciences*, vol. 11, no. 11673, pp. 1 – 14, 2021.
- [17] G. Lv, Z. Zhang, Y. Liu, T. Zhou, *Analysis of Forces in Linear Synchronous Motor With Propulsion, Levitation and Guidance for High-Speed Maglev*, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 10, no. 3. pp. 2903 – 2911, 2022.
- [18] G. Li, X. Wang, P. Cui, J. Li, *Analysis of superconducting linear synchronous motor for electromagnetic propulsion*, *Cluster Computing*, vol. 22, pp. 2709 – 2717, 2019.
- [19] M. Lu, D. Zhang, B. Xu, H. Yang, Y. Xin, *Multiphase SVPWM Strategy Analysis and Implementation of Seven-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor*, *Hindawi Complexity*, vol. 2020, pp. 1 – 12, 2020.
- [20] V. Ballestín-Bernad, J. Sergio Artal-Sevil, J. A. Domínguez-Navarro, *A Review of Transverse Flux Machines Topologies and Design*, *Energies*, vol. 14, no. 21, pp. 1 – 34, 2021.
- [21] P. Idziak, K. Kowalski, L. Nowak, Ł. Knypiński, *FE transient analysis of magneostriptive actuator*, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, No. s1, vol. 51, pp. S81 – S87, 2016.
- [22] P. Mynarek, M. Kowol, M. Łukaniszyn, *Modelowanie, analiza i weryfikacja zjawisk cieplnych na przykładzie 3-fazowego silnika indukcyjnego*, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, nr. 66, pp. 371 – 376, 2012
- [23] Ł. Knypiński, *Zastosowanie metody wzorowanej na echolokacyjnym zachowaniu nietoperzy w optymalnym projektowaniu przetworników elektromagnetycznych*, *Poznań University Academic Journals, Electrical Engineering*, no. 91, s. 365 – 374, 2017.

- [24] D. Karaboga, B. Basturk, *Artificial bee colony (ABC) optimization algorithm for solving constrained optimization problems*, Foundations of Fuzzy Logic and Soft Computing, SpringerVerlag Berlin, pp. 789 – 798, 2007.
- [25] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, A. Lewis, *Grey wolf optimizer*, Advances in Electrical Engineering, vol. 69, pp. 46 – 61, 2014.
- [26] Ł. Knypiński, L. Nowak, *Zastosowanie algorytmu szarych wilków do rozwiązania zadań optymalizacji urządzeń elektromagnetycznych*, Poznań University Academic Journals. Electrical Engineering, no. 100, s. 133 – 144, 2019.
- [27] C. Jędryczka, R. Wojciechowski, A. Demenko, *Influence of squirrel cage geometry on the synchronisation of the line start permanent magnet synchronous motor*, IET Sci. Meas. Techn., vol. 9, pp. 197-203, 2015.
- [28] Ł. Knypiński, M. Krótki, M. Kurzawa, *Optymalizacja dławika wygładzającego z zastosowaniem metody roju cząstek*, Poznań University Academic Journals. Electrical Engineering, no. 104, s. 45 – 54, 2020.
- [29] X. S. Yang, S. Deb, *Cuckoo search via Lévy flights*, World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing, pp. 210 – 214, 2009.
- [30] M. Khajezadeh, A. Iraj, A. Majdi, S. Keawsawasvong, M. L. Nehdi, *Adaptive Salp Swarm Algorithm for Optimization of Geotechnical Structures*, Applied Sciences, vol. 12, no. 13, pp. 1 – 23, 2022.
- [31] F. M. Palangar, W. Soong, N. Bianchi, R. Wang, *Design and optimization techniques in performance improvement of line-start permanent magnet synchronous motors: a review*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 57, no. 9, pp. 1864 – 1885, 2021.
- [32] T. C. Bora, L. dos S. Coelho, L. Lebensztajn, *Bat-inspired optimization approach for the brushless DC wheel motor problem*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, pp. 947 – 950, 2012.
- [33] G. Cvetovski, L. Petkowska, *Optimal design of axial flux permanent magnet motor using Cuckoo search*, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 12, 25 – 28, 2016.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej

Współpraca i wspólna realizacja badań Autora wniosku z Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille - L2EP (Lille University of Technology, University Lille) rozpoczęła się w 2007. **Habilitant odbył podczas trwania studiów doktoranckich czteromiesięczny staż naukowy w ramach programu edukacyjnego LPP Erasmus w Lille University.** Opiekunami Wnioskodawcy byli: prof. Francis Piriou oraz dr Yvonnick Le Manech. Prowadzone wspólnie z dr Yvonnickiem Le Manechem badania dotyczyły modelowania rozkładu

pola w bezszczotkowym silniku prądu stałego. W 2010 roku został opublikowany wspólny artykuł w monografii *Computer Applications in Electrical Engineering*. W marcu 2019 roku, profesor Yvonnick Le Manech zaprosił Habilitanta do przeprowadzenia wykładu w ramach programu Erasmus+ zatytułowanego „*Modern metaheuristic optimization methods in electromagnetic devices design*”. Tygodniowe wykłady o podobnej tematyce Autor przeprowadził dwukrotnie w 2022 roku. We wrześniu 2019 Habilitant został zaproszony przez prof. Yvonnicka Le Manech do Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance w celu realizacji wspólnych badań naukowych. W 2020 Autor planował wyjazd na staż do Lille, jednak ze względu na panującą sytuację epidemiologiczną wyjazd nie odbył się, a współpraca i wspólne badania realizowane była w formie zdalnej. Przygotowany został wspólnie z prof. Frederickiem Gillonem artykuł na konferencję EPNC. **Habilitant odbył 30 dniowy staż pod opieką prof. Yvonnick Le Manecha oraz prof. Frederickiem Gillona w Lille University realizowany w ramach projektu Miniatura 3.**

W wyniku realizowanych wspólnych badań zostało opublikowanych osiem artykułów naukowych. Cztery publikacje zostały opublikowane w czasopismach naukowych oraz cztery w materiałach konferencyjnych. Należą do nich:

- Łukasz Knypiński, Lech Nowak, Kazimierz Radziuk, **Yvonnick Le Manech**, *The field-circuit analysis of the start-up operation of the brushless DC motor*, *Computer Applications in Electrical Engineering*, Poznań 2010, pp. 93 – 105, 2010, (7 pkt. MNiSW);
- Łukasz Knypiński, Karol Pawełoszek, **Yvonnick Le Manech**, *Optimization of Low-Power Line-Start PM Motor Using Gray Wolf Metaheuristic Algorithm*, *Energies*, vol. 13, no. 5, 2020, (IF 3.004, 140 pkt. MEiN);
- Łukasz Knypiński, **Frederick Gillon**, *Sizing by Optimization of Line-Start Synchronous Motor*, *Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits - EPNC 2020*, Torino, Italy, April, 7-9, 2021, pp. 1 – 2;
- Łukasz Knypiński, **Frederick Gillon**, *Sizing by optimization of line-start synchronous motor*, *COMPEL*, vol. 41, no. 2, pp. 690 – 702, 2022, (IF 0.755, 40 pkt. MEiN);
- Łukasz Knypiński, Ramesh Devarapalli, **Yvonnick Le Menach**, *Constrained optimization of the brushless DC motor using salp swarm algorithm*, *Materiały Konferencyjne LV Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME 2022*, Poznań, 27 – 28 kwietnia 2022 r, s. 1 – 4;
- Łukasz Knypiński, Ramesh Devarapalli, **Yvonnick Le Menach**, *Constrained optimization of the brushless DC motor using salp swarm algorithm*, *Archives of Electrical Engineering*, vol. 71, no. 3, pp. 775 – 787, 2022, (100 pkt. MEiN);
- Łukasz Knypiński, Ramesh Devarapalli, **Frederick Gillon**, *The hybrid algorithms in constrained optimization of PM motors*, 11-th International

Conference on Computation in Electromagnetics – CEM 2023, Cannes, France, 11 – 14 kwietnia 2023, pp. 1 – 2.

- Reddy, Łukasz Knypiński, Bathina Venkateswararao, Ramesh Devarapalli, **Yvonnick Le Menach**, Mehmet Cunkas, *Optimal design of the switched reluctance motor to the electric vehicle*, Materiały 17 Konferencji Postępy w Elektrotechnice Stosowanej – PES 17, Kościelisko, Polska, 26.06-30.06.2023, pp. 1 – 5.

Habilitant od 2018 roku prowadzi regularną współpracę z ośrodkami naukowymi z Hiszpanii (University of Castilla-La Mancha), Wielkiej Brytanii (University of Southampton) oraz Indii (Lendi Institute of Engineering and Technology, Rajkiya Engineering College Sonbhadra oraz Velagapudi Ramakrishna Siddhartha Engineering College) dotyczącą zastosowania niedeterministycznych (heurystycznych) metod optymalizacji do optymalnej syntezy urządzeń elektromagnetycznych i systemów energetycznych. Do opublikowanych prac w czasopismach naukowych należą:

- Cezary Jędryczka, Łukasz Knypiński, Andrzej Demenko, **Jan Sykulski**, *Methodology for Cage Shape Optimization of a Permanent Magnet Synchronous Motor Under Line Start Conditions*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 54, no. 3, 2018, (IF 1.651, 25 pkt. MEiN);
- **Ramesh Devarapalli**, Nikhil Kumar Sinha, **Bathina Venkateswara Rao**, Łukasz Knypinski, Naraharisetti Jaya Naga Lakshmi, **Fausto Pedro García Márquez**, *Allocation of real power generation based on computing over all generation cost: an approach of salp swarm algorithm*, Archives of Electrical Engineering, vol. 70, no. 2, pp. 337 – 349, 2021, (100 pkt. MEiN);
- Łukasz Knypiński, **Ramesh Devarapalli**, Yvonnick Le Menach, *Constrained optimization of the brushless DC motor using salp swarm algorithm*, Archives of Electrical Engineering, vol. 71, no. 3, pp. 775 – 787, 2022, (100 pkt. MEiN);
- Łukasz Knypiński, Sebastian Kuroczycki, **Fausto Pedro Garcia Marquez**, *Minimization of Torque Ripple in the Brushless DC Motor Using Constrained Cuckoo Search Algorithm*, Electronics, vol. 10, no. 18, s. 1 – 20, 2021, (IF 2.394, 100 pkt. MEiN);
- Arindita Saha, Puja Dash, Naladi Ram Babu, **Tirumalasetty Chiranjeevi**, Łukasz Knypińsk, *Impact of Spotted Hyena Optimized Cascade Controller in Load Frequency Control of Wave-Solar-Double Compensated Capacitive Energy Storage Based Interconnected Power System*, Energies, vol. 15, no. 19, pp. 1 – 25, 2022, (IF 3.252, 140 pkt. MEiN);
- Arindita Saha, Puja Dash, Naladi Ram Babu, **Tirumalasetty Chiranjeevi**, Mudadla Dhananjaya, Łukasz Knypiński, *Stability Evaluation of an Integrated Biodiesel-Geothermal Power Plant-Based Power System with Spotted Hyena*

Optimized Cascade Controller, Sustainability, vol. 14, no. 22, 2022, (IF 3.889, 100 pkt. MEiN);

- Joddumahanthi Vijaychandra, Bugatha Ram Vara Prasad, Vijaya Kumar Darapureddi, **Bathina Venkateswararao**, Łukasz Knypiński, *A Review of Distribution System State Estimation Methods and Their Applications in Power Systems*, Electronics, vol. 12, no. 3, pp. 1 – 18, 2023, (IF 2.690, 100 pkt. MEiN);
- **Bathina Venkateswararao**, **Ramesh Devarapalli**, Łukasz Knypiński, R. Gowri Sankara Rao, **Fausto Pedro García Márquez**, *Shunt capacitor placement under n-1 contingency condition: Realization with Mi Power package*, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 99, no. 3, pp. 164 – 171, 2023, (70 pkt. MEiN);
- Łukasz Knypiński, A. V. Reddy, **Bathina Venkateswararao**, **Ramesh Devarapalli**, *Optimal design of brushless DC motor for electromobility propulsion applications using Taguchi method*, Journal of Electrical Engineering, vol. 74, no. 2, pp. 123 – 128, 2023, (IF: 0.840, 40 pkt. MEiN);
- Naladi Ram Babu, **Tirumalasetty Chiranjeevi**, **Ramesh Devarapalli**, Łukasz Knypiński, **Fausto Pedro García Márquez**, *Real-time validation of an automatic generation control system considering HPA-ISE with crow search algorithm optimized cascade FOPDN-FOPIDN controller*, Archives of Control Sciences, vol. 33, no 2, pp. 371-390, 2023, (IF: 1.443, 100 pkt. MEiN).

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę

Do działalności dydaktycznej Autora należy zaliczyć prowadzenie zajęć dydaktycznych na uczelni, promotorstwo prac inżynierskich i magisterskich, pełnienie funkcji członka Komisji Egzaminów Dyplomowych. Habilitant prowadził lub obecnie prowadzi następujące zajęcia dydaktyczne na Politechnice Poznańskiej:

- *Algorytmy optymalizacji w projektowaniu*, wykład, projekt, II stopień, kierunek Elektrotechnika;
- *Electrical machines*, wykład, laboratorium, ćwiczenia, Erasmus;
- *Electrical machines and drives in control engineering*, wykład, laboratorium, Erasmus;
- *CAD systems in digital prototyping of technical objects*, wykład, projekt, ćwiczenia, Erasmus;
- *Optimisation methods in electromagnetic devices designs*, wykład, projekt, Erasmus;
- *Maszyny elektryczne*, laboratorium, I stopnia, kierunek Elektrotechnika;

- *Maszyny elektryczne*, laboratorium, I stopnia, kierunek Elektromobilność;
- *Elektrodynamika techniczna*, laboratorium, I stopnia, kierunek Elektrotechnika;
- *Electrical machines and drives in control engineering*, laboratorium, I stopnia, kierunek Automatic control and robotics;
- *Electrical machines*, laboratorium, I stopnia, kierunek Automatic Control and Robotics;
- *Maszyny elektryczne*, laboratorium, I stopnia, kierunek Energetyka;
- *Maszyny elektryczne*, laboratorium, II stopnia, kierunek Elektroenergetyka;
- *Elektromagnetyczne przetwarzanie energii*, laboratorium, II stopnia, kierunek Energetyka.

Habilitant prowadził następujące wykłady dydaktyczne w ramach programu Erasmus+ w Lille University:

- *New nature inspired optimization methods applied in electromagnetic devices designing*, luty 2020;
- *Modern metaheuristic optimization methods in electromagnetic devices design*, styczeń 2022;
- *Metaheuristic optimization algorithms in electromagnetic devices design*, grudzień 2022.

Habilitant pełni rolę promotora pomocniczego w następujących przewodach doktorskich:

- *Obwodowo-polowa analiza i synteza układów uzwojeń w systemach bezprzewodowej transmisji energii elektrycznej* (praca złożona w Dziekanacie Wydziału Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki Politechniki Poznańskiej);
- *Algorytmy optymalizacji wspomagające planowanie energooszczędnej trajektorii prędkości elektrycznego zespołu trakcyjnego*.

Habilitant jako promotor prowadził na studiach I i II stopnia następujące prace dyplomowe:

- *Wpływ kształtu impulsów napięciowych zasilających uzwojenia bezszczotkowego silnika prądu stałego na jego parametry dynamiczne*;
- *Projekt elektromagnetycznego chwytaka drzwiowego*;
- *Projekt imadła elektromagnetycznego*;
- *Analiza porównawcza konstrukcyjnych metod minimalizacji momentu zaczepowego w bezszczotkowych silniach prądu stałego*;
- *Modelowanie rozkładu pola w jednofazowym silniku indukcyjnym z uzwojeniem pomocniczym zwartym*;

- *Projekt stanowiska laboratoryjnego do badania silnika magnetoelektrycznego małej mocy;*
- *Zastosowanie niedeterministycznych metod optymalizacji w projektowaniu obiektów technicznych w energetyce (II stopień);*
- *Projekt i wykonanie łodzi zasilanej energią słoneczną;*
- *Analiza porównawcza silników elektrycznych stosowanych w systemach dźwigowych;*
- *Analiza stanów pracy reluktancyjnego silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim;*
- *Projekt układu do odzysku energii w systemach drzwi przesuwnych;*
- *Zastosowanie algorytmu kukulki do wyznaczenia kształtu napięciowych impulsów zasilających uzwojenia silnika BLDC (II stopień);*
- *Modelowanie rozkładu pola magnetycznego w silniku do wycieraczek samochodowych;*
- *Analiza porównawcza współczesnych zabezpieczeń biometrycznych;*
- *Projekt i wykonanie stanowiska laboratoryjnego do zautomatyzowanego badania bezszczotkowego silnika prądu stałego.*

Autor był recenzentem następujących prac dyplomowych na Wydziale Elektrycznym oraz Wydziale Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki:

- *Modernizacja stanowiska do badania bezszczotkowego silnika prądu stałego;*
- *Projekt sygnalizacji świetlnej przejścia dla pieszych sterowanej za pomocą mikroprocesora;*
- *Analiza kompatybilności elektromagnetycznego układu przewodowego ładowania baterii trakcyjnego autobusu elektrycznego;*
- *Projekt chwytaka napędzanego aktuatorem wykonanym z materiału charakteryzującego się pamięcią kształtu;*
- *Projekt aplikacji mobilnej do bezprzewodowego monitorowania urządzeń;*
- *Projekt układu do rejestracji przebiegu prądu wykorzystaniem platformy Raspberry Pi;*
- *Oprogramowanie platformy Intel Movidius do zwarć zwojowych w 3-fazowym uzwojeniu stojana silnika indukcyjnego klatkowego;*
- *Oprogramowanie do wyznaczania i wizualizacji nieliniowych charakterystyk przetwornika magnetostrykcyjnego;*
- *Projekt chwytaka napędzanego aktuatorem wykonanym z materiału charakteryzującego się pamięcią kształtu;*
- *Projekt stanowiska laboratoryjnego do badania stanów pracy aktuatorów wykonanych ze stopu z pamięcią kształtu;*

- *Projekt aplikacji mobilnej do sterowania ręką robota;*
- *Projekt systemu do testowania urządzeń pracujących w sieci Z-wave;*
- *Projekt tekstronicznej opaski grzewczej;*
- *Analiza porównawcza współczesnych materiałów magnetycznych stosowanych w transformatorach;*
- *Projekt dwupasmowego bezszczotkowego silnika prądu stałego;*
- *Projekt wyświetlacza widmowego;*
- *Projekt i wykonanie układu symulatora dźwigu osobowego z wykorzystaniem sterownika SD-4;*
- *Projekt i wykonanie stanowiska laboratoryjnego do badania zjawisk hipertermii magnetycznej z wykorzystaniem wirującego pola magnetycznego;*
- *Projekt układu do przetwarzania wibracji strun gitary na sygnał elektryczny;*
- *Analiza wpływu liczby par biegunów wirnika i żłobków stojana na straty w rdzeniu i moment elektromagnetyczny silnika BLDC.*

Habilitant był opiekunem stażu prowadzonego w ramach programu Erasmus:

- *Optimization of the Electrical Motors* (staż dla absolwenta studiów inżynierskich Uniwersytetu Bursa Uludağ), zrealizowany 20.09.2021 – 01.02.2022.

Do ***działań organizacyjnych*** Habilitanta należą przede wszystkim:

- pełnienie funkcji członka Odwoławczej Uczelnianej Komisji Dyscyplinarnej dla Doktorantów, kadencja 1 stycznia 2009 do 31 grudnia 2010,
- pełnienie funkcji przewodniczącego Samorządu Doktorantów Wydziału Elektrycznego 2008/2009 oraz 2009/2010,
- pełnienie funkcji sekretarza Samorządu Doktorantów Wydziału Elektrycznego 2010/2011,
- pełnienie funkcji członka Wydziałowej Komisji Stypendialnej ds. Doktorantów w latach: 2009/2010, 2010/2011 oraz 2011/2012,
- aktywne uczestnictwo w Targach Edukacyjnych w latach: 2009 oraz 2015,
- aktywne uczestnictwo w Dniach Otwartych Politechniki Poznańskiej – promowanie kierunku Elektrotechnika.

Nagrody uzyskane przez Habilitanta:

- *Nazwa nagrody:* Distinguished Paper Award founded by the Dean of Electrical Engineering Faculty at the West Pomeranian University of Technology in Szczecin.

Organ przyznający: komitet organizacyjny konferencji XIII International PhD Workshop OWD 2011 – Wisła-Głębce, 23-26 October 2011, POLAND.

Tytułem: artykuł zatytułowany: “Optimization and field-circuit simulation of permanent magnet brushless DC motor”.

- *Nazwa nagrody:* Young Experts Main Awards.
Organ przyznający: komitet Młodych Ekspertów konferencji XIII International PhD Workshop OWD 2011 – Wisła-Głębce, 23-26 October 2011, POLAND.
Tytułem: artykuł zatytułowany: “Optimization and field-circuit simulation of permanent magnet brushless DC motor”.
- *Nazwa nagrody:* Young Researcher Best Paper Award Winner (COMPEL).
Organ przyznający: redaktor naczelny czasopisma Compel – prof. J. Sykulski.
Tytułem: artykuł prezentowany na 23 Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits Symposium (EPNC 2014), 2-4 July 2014, Pilsen, Czech Republic za artykuł “Optimization of the rotor geometry of the line-start permanent magnet synchronous motor by the use of particle swarm algorithm”.
- *Nazwa nagrody:* Nagroda ze Specjalnego Funduszu Nagród dla Nauczycieli Akademickich.
Organ przyznający: Rektor Politechniki Poznańskiej.
Tytułem: za osiągnięcia naukowe w roku akademickim 2016/2017.
- *Nazwa nagrody:* Nagroda ze Specjalnego Funduszu Nagród dla Nauczycieli Akademickich.
Organ przyznający: Rektor Politechniki Poznańskiej.
Tytułem: za osiągnięcia organizacyjne w roku akademickim 2017/2018.
- *Nazwa nagrody:* Nagroda ze Specjalnego Funduszu Nagród dla Nauczycieli Akademickich.
Organ przyznający: Rektor Politechniki Poznańskiej.
Tytułem: za osiągnięcia organizacyjne w roku akademickim 2018/2019.
- *Nazwa nagrody:* Nagroda ze Specjalnego Funduszu Nagród dla Nauczycieli Akademickich.
Organ przyznający: Rektor Politechniki Poznańskiej.
Tytułem: za osiągnięcia organizacyjne w roku akademickim 2019/2020.
- *Nazwa nagrody:* Nagroda ze Specjalnego Funduszu Nagród dla Nauczycieli Akademickich.
Organ przyznający: Rektor Politechniki Poznańskiej.
Tytułem: za osiągnięcia organizacyjne w roku akademickim 2020/2021.
- *Nazwa nagrody:* Nagroda ze Specjalnego Funduszu Nagród dla Nauczycieli Akademickich.
Organ przyznający: Rektor Politechniki Poznańskiej.
Tytułem: za osiągnięcia naukowe w roku akademickim 2021/2022.

Do **działalności popularyzującej naukę** Habilitanta zaliczam m.in.:

- Pełnienie funkcji sekretarza naukowego w kwartalniku Archives of Electrical Engineering (100 pkt. MEiN);
- Pełnienie funkcji członka redakcji (Editorial Board) w czasopiśmie Selcuk University Journal of Engineering Sciences, Konya, Turcja;
- Pełnienie funkcji redaktora tematycznego w czasopiśmie Energies (IF 3.252, 140 pkt. MEiN);
- Pełnienie funkcji członka zespołu doradczego (Topical Advisory Panel) w czasopiśmie Algorithms (40 pkt. MEiN);
- Pełnienie funkcji redaktor gościnnego (Guest Editor) wydania specjalnego „*Metaheuristic Algorithms in Optimal Design of Engineering Problems*” w czasopiśmie Algorithms (40 pkt. MEiN);
- Pełnienie funkcji członka zespołu recenzentów (Reviewer Board) w czasopiśmie Actuators (IF 2.523, 20 pkt. MEiN);
- Pełnienie funkcji członka zespołu recenzentów (Reviewer Board) w czasopiśmie Algorithms (40 pkt. MEiN);
- Pełnienie funkcji członka zespołu recenzentów (Reviewer Board) w czasopiśmie Sensors (IF 3.847, 100 pkt. MEiN);
- Pełnienie funkcji członka zespołu recenzentów w czasopiśmie Journal of Energy and Power Engineering, ISSN: 1934-8975, Wilmington DE 19804, USA;
- Pełnienie funkcji członka zespołu recenzentów (Reviewer Board) w czasopiśmie Sustainability (IF 3.889, 100 pkt. MEiN);
- Pełnienie funkcji członka w Komisji Nauk Elektrycznych przy O/PAN w Poznaniu.
- Pełnienie funkcji członka komitetu naukowego konferencji międzynarodowych:
 - International Conference on Artificial Intelligence and Computer Engineering (członek komitetu technicznego);
 - Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics – WZEE 2021.
- Pełnione funkcje członka komitetu organizacyjnego konferencji krajowych:
 - Sympozjum Maszyn Elektrycznych – SME’2020, Poznań, Polska, 27-28.04.2022.

Wygłoszenie wykładów zaproszonych:

- Seminarium: Sterowanie i Przetwarzanie Sygnałów w Elektrotechnice, Komisja Nauk Elektrycznych, oddział Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu –

„Zastosowanie algorytmu genetycznego z funkcją kary do optymalizacji silnika BLDC z polowym modelem zjawisk”, 19 kwietnia 2013 r.

- International Conference on Engineering Technologies ICENTE'21, Konya, Turcja – *„Metaheuristic algorithms applied in permanent magnet motors optimal design”, 18 listopada 2021 r.*
- IV Posiedzenie Plenarne Komitetu Elektrotechniki Polskiej Akademii Nauk – *„Efektywne metody optymalizacji maszyn magnetoelektrycznych w ujęciu polowym”, 12 maja 2022 r.*
- Koło Naukowe Magnesia – *„Niedeterministyczne metody optymalizacji jako efektywne narzędzia wspomagające proces projektowania przetworników elektromechanicznych”, 13 maja 2015 r.*

Aktywne recenzowanie referatów konferencyjnych – 34 prac, jak również artykułów w czasopismach naukowych – 136 artykułów.

Członek stowarzyszeń naukowych:

- Polskie Towarzystwo Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej;
- Emerald Literati Network.



(podpis wnioskodawcy)