

Optymalizacja dławika o nastrajanej wartości indukcyjności

Streszczenie. W artykule przedstawiono algorytm i oprogramowanie do optymalizacji dławika o nastrajanej (zmiennej) wartości indukcyjności. Do optymalizacji zastosowana została metoda salpid, należąca do grupy metod inteligencji roju. Celem optymalizacji było uzyskanie czterech odpowiednio dobranych i proporcjonalnych względem siebie wartości indukcyjności rozpatrywanego dławika. Optymalizowany w pracy dławik został opisany przy wykorzystaniu trzech zmiennych decyzyjnych. W wielokryterialnej (kompromisowej) funkcji celu uwzględniono cztery wartości indukcyjności. Opracowano model matematyczny (o parametrach skupionych) optymalizowanego dławika. Model matematyczny połączono z procedurą optymalizacyjną, zarządzającą tym procesem. Przedstawiono i omówiono wybrane wyniki obliczeń optymalizacyjnych.

Abstract. The article presents an algorithm and computer script to optimization of a tunable inductive choke. The salp swarm algorithm was applied in the optimization procedure. A mathematical model of an optimized of a tunable inductive choke was developed. The structure of the tunable inductive choke was described by three design variables. The multi-objective compromise function was taken into account. The optimization procedure managing the cooperation with mathematical model of the optimized electromagnetic devices. Selected results of the optimization were presented and discussed. (**Optimization of a tuned inductive choke**).

Słowa kluczowe: optymalizacji, metoda salpid, dławik o nastrajanej indukcyjności, kompromisowa funkcja celu

Keywords: optimization, modified particle swarm optimization, tuned choke, multi-objective compromise function

Wstęp

W współczesnym procesie projektowania urządzeń elektromagnetycznych stosowane są techniki i podejścia, które umożliwiają wykorzystanie metody elementów skończonych (MES) [1]. MES umożliwia wyznaczenie rozkładu pola w analizowanym urządzeniu oraz wyznaczenie jego parametrów funkcjonalnych z dużą dokładnością [2]. Projektant wykorzystując własne doświadczenie, a także intuicję może dobrać wymiary początkowe, dla których poprzez zmiany poszczególnych zmiennych wykonywane są obliczenia iteracyjnie polegające na rozwiązaniu zadania analizy. Następnie wykonywane są obliczenia symulacyjne polegające na rozwiązaniu zadania analizy dla różnych zadanych parametrów [3], opisujących strukturę analizowanego urządzenia elektromagnetycznego.

Projektant wykonując obliczenia symulacyjne dla ciągu wybranych struktur, dąży do odnalezienia parametrów strukturalnych, dla których parametry funkcjonalne projektowanego urządzenia są satysfakcjonujące [4, 5].

Natomiast realizując proces syntezy, nazywany optymalnym projektowaniem wyznaczamy wartości parametrów strukturalnych z wykorzystaniem algorytmu optymalizacji, który w kolejnych iteracjach poszukuje automatycznie (według przyjętych reguł) parametry strukturalne zapewniające wartości parametrów projektowanego urządzenia spełniające narzucone kryteria [6, 7].

Współcześnie najbardziej powszechnie stosowane są niedeterministyczne metody optymalizacji, nazywane również metodami heurystycznymi [8]. Tego typu metody doskonale nadają się do optymalizacji urządzeń opisanych przy wykorzystaniu mniej czasochłonnych modeli o parametrach skupionych oraz bardziej złożonych obliczeniowo modeli matematycznych opracowanych na podstawie MES [9].

Obecnie liczba metod heurystycznych jest bardzo duża i wciąż opracowywane są nowe metody. Jednak w ostatnich latach bardzo silną grupę stanowią metody opracowane na podstawie obserwacji grup osobników w ich środowisku naturalnym (nature inspired algorithms) [10].

Do tego typu należą algorytmy klasyczne, takie jak algorytmy genetyczne oraz metoda roju cząstek, które oferują użytkownikom dobrą zbieżność oraz charakteryzują się dużym prawdopodobieństwem znalezienia ekstremum

globalnego. Są to metody sprawdzone i wielokrotnie stosowane do rozwiązania różnorodnych problemów optymalizacyjnych. Coraz częściej jednak stosowane są nowe metody, takie jak: metoda szarych wilków, metoda salpidów, metoda wróbla [11], czy nawet metoda szympansov [12].

Celem artykułu jest opracowanie modelu matematycznego, tj. modelu o parametrach skupionych bazującego na teorii obwodów magnetycznych, dławika o zmiennej, nastrajanej wartości indukcyjności [13] oraz wykonanie optymalizacji przy wykorzystaniu wybranej metody niedeterministycznej (algorytm salpidów).

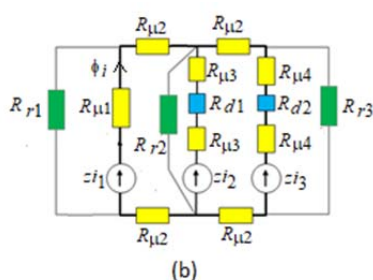
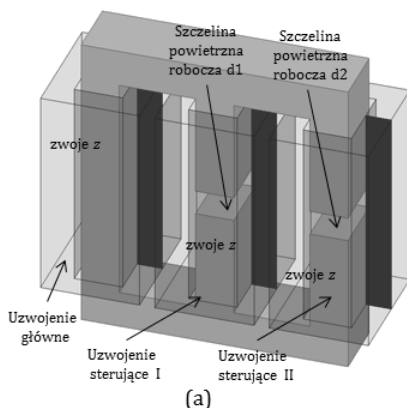
Model matematyczny nastrajanej cewki indukcyjnej

W pracy Autorzy podjęli się optymalizacji konstrukcji dławika o zmiennej, nastawnej wartości indukcyjności, którego konstrukcję zaproponowano w pracy [13]. Głównym obszarem optymalizacji konstrukcji dławika był odpowiedni dobór szczelin powietrznych układu dławika (rys. 1a), oraz liczby zwojów trzech cewek zastosowanych w dławiku, tj. cewki głównej i dwóch cewek sterujących. Szczegółowe informacje o konstrukcji samego dławika oraz sposobie jego sterowania przedstawiono w [13]. W pracy do celów procesu optymalizacyjnego Autorzy podjęli się opracowania zastępczego modelu o parametrach skupionych dławika, bazującego na teorii obwodów magnetycznych. Schemat zastępczy dławika przedstawiający układ wzajemnie połączonych ze sobą reluktancji przedstawiono na rys.1b. Reluktancje oznaczone kolorem żółtym na schemacie reprezentują reluktancje odnoszące się do obszarów z rdzeniem magnetycznym rozpatrywanego dławika. Kolorem zielonym oznaczono natomiast reluktancje reprezentujące rozproszenie w obszarze poszczególnych cewek dławika, podczas gdy kolorem niebieskim oznaczono reluktancje znajdujące się w obszarze szczelin powietrznych. Przy określaniu wartości poszczególnych reluktancji przyporządkowanych poszczególnym fragmentom rdzenia posłużono się klasyczną formułą obliczania wartości reluktancji, tj. zastosowano następującą zależność:

$$(1) \quad R_{\mu i} = \frac{l_{mi}}{\mu_0 \mu_r S_i},$$

gdzie: l_{mi} jest długością i -tego fragmentu obwodu magnetycznego dławika, S_i jest polem przekroju i -tego fragmentu

obwodu magnetycznego; podczas, gdy μ_o i μ_r reprezentują odpowiednio przenikalność magnetyczną powietrza oraz względną przenikalność magnetyczną.



Rys.1. Widok układu dławika o zmiennej indukcyjności (a) i jego model o parametrach skupionych (b)

W celu wyznaczenia wartości reluktancji opisujących drogę strumienia rozproszenia w obszarze każdej z cewek analizowanego dławika zastosowano formułę zaproponowaną w [14], tj.:

$$(2) \quad R_{ri} = \frac{h_{ri}}{\mu_o D_{wi} c_{wi} K_{Ri}}$$

w której: h_{ri} stanowi wysokość i -tego uzwojenia dławika, D_{wi} jest dystansem pomiędzy danym i -tym uzwojeniem a kolumną rdzenia dławika, c_{wi} średnią wartością obwodu i -tego uzwojenia, podczas gdy K_{Ri} reprezentuje współczynnik Rogowskiego [15].

Natomiast, przy określaniu wartości reluktancji opisujących obszar szczelin powietrznych kolumn rozpatrywanego dławika Autorzy wykorzystali podejście zaproponowane przez Schwarza-Christoffela [16]. W podejściu tym wartość reluktancji R_{di} rozpatrywanej szczeliny powietrznej uzależniona jest m. in. od lokalizacji położenia szczeliny w obszarze kolumny (tj. czy dana szczelina jest symetryczna względem jarzma górnego i dolnego), szerokości w_c oraz głębokości h kolumny, wysokości szczeliny powietrznej l_a , oraz od tego czy dana kolumna znajduje się w części skrajnej czy środkowej obwodu magnetycznego. Ponadto, podejście Schwarza-Christoffela pozwala na uwzględnienie nierównomierności rozkładu pola, szczelin o dużej wartości l_a . W przypadku układu rozpatrywanego w pracy (rys.1a), szczeliny robocze zostały ułożone w kolumnie środkowej oraz kolumnie skrajnej prawej. Stosując metodę Schwarza-Christoffela wartość reluktancji R_{di} danej szczeliny powietrznej oblicza się jako równoległe połączenie dwóch składowych reluktancji (rys. 2 i rys. 3). Wówczas, dla zastosowanego podejścia, wartość reluktancji R_{d1} szczeliny kolumny środkowej będzie równoległym połączeniem dwóch reluktancji R'_g (rys. 2), obliczonych wg poniżej relacji:

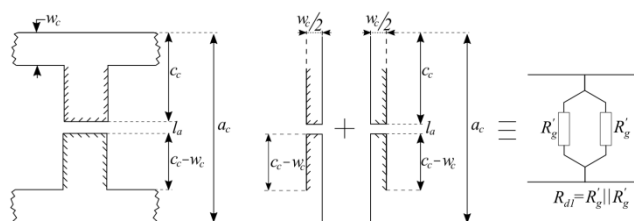
$$(3) \quad R'_g = \frac{1}{\mu_o h \left[\frac{w_c}{2l_a} + \frac{1}{\pi} \left(1 + \ln \frac{\pi(c_c - w_c)}{2l_a} \right) \right]}$$

podczas, gdy wartość R_{d2} dla szczeliny kolumny skrajnej (rys. 3), obliczona jako równoległe połączenie reluktancji R'_g – relacja (3) – oraz R''_g – relacja (4).

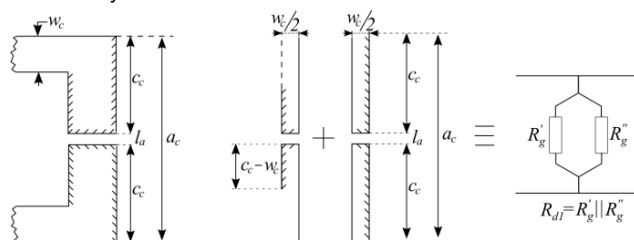
$$(4) \quad R''_g = \frac{1}{\mu_o h \left[\frac{w_c}{2l_a} + \frac{1}{\pi} \left(1 + \ln \frac{\pi c_c}{2l_a} \right) \right]}$$

wartości znajdujących się w zależnościach (3) i (4) zestawiono na rysunkach 2 i 3.

Głównym czynnikiem podlegającym optymalizacji w rozpatrywanym układzie jest przede wszystkim stosunek indukcyjności różnych konfiguracji załączeń uzwojeń sterujących. W zależności od sposobu konfiguracji (włącz/wyłącz) uzwojeń sterujących w dławiku dla 4 możliwych konfiguracji uzyskuje się również 4 wartości indukcyjności, oznaczone jako L_1 , L_2 , L_3 , oraz L_4 . Przy czym przez „włączenie” uzwojenia rozumie się w tym przypadku połączenie (zwarcie) końcówek danego uzwojenia, podczas gdy uzwojenia pozostaje rozwarte jest ono w stanie „wyłączenia” [13]. Sposób konfiguracji uzwojeń odpowiadający danej indukcyjności zestawiono w Tabeli 1.



Rys.2. Widok szczeliny powietrznej w obszarze kolumny środkowej dławika z rysunku 1a



Rys.3. Widok szczeliny powietrznej w obszarze kolumny prawej skrajnej dławika z rysunku 1a

Tabela 1. Zależność indukcyjności od sposobu konfiguracji uzwojeń sterujących

Indukcyjność widziana od strony uzwojenia głównego	Uzwojenie sterujące I	Uzwojenie sterujące II
L_1	wyłączone	wyłączone
L_2	załączone	wyłączone
L_3	wyłączone	załączone
L_4	załączone	załączone

W pracy wartość indukcyjności obliczano z definicji:

$$(5) \quad L_i = \frac{\psi_i}{i_1} = \frac{z \phi_i}{i_1}$$

gdzie: ψ_i jest strumieniem skojarzonym z uzwojeniem głównym dławika i -tej konfiguracji uzwojeń sterujących, i_1 daną wartością prądu w uzwojeniu głównym, ϕ_i strumieniem magnetycznym w kolumnie uzwojenia głównego obwodu magnetycznego, a z liczbą zwojów uzwojenia głównego (w projekcie przyjęto, że liczba zwojów uzwojeń sterujących będzie również wynosić z). Wartości

indukcyjności, korzystając z schematu zastępczego obliczano metodą oczkową, przy czym przyjęto, że gdy dane uzwojenie sterujące jest załączone siła magnetomotoryczna tego uzwojenia będzie równa sile magnetomotorycznej uzwojenia głównego.

Niedeterministyczna metoda salpid

Metoda salpid (salpów) została opracowana w 2017 roku przez Mirjalili [17]. Salpy należące do gromady sprzągli tworzą duże kolonie, najczęściej poruszające się w szyku łańcuchowym. Salpidy zamieszkują wody równikowe oraz wody zimne. Najliczniejsze ich skupiska występują w pobliżu Antarktydy. Salpy poruszają się wykorzystując kurczenie i przepompowywanie wody przez swoje galaretowate ciało, co jest przykładem jednego z bardziej efektywnych sposobów poruszania w przyrodzie.

Metodę salpów możemy zaliczyć do grupy metod inteligencji roju, jednak najnowsze badania wykazują dużą zbieżność metody w porównaniu z klasyczną metodą roju cząstek [18].

Model matematyczny metody optymalizacji został opracowany na podstawie społecznych interakcji obserwowanych w koloniach salpów podczas poszukiwania pożywienia. W metodzie przyjmuje się, że łańcuch składający się z wszystkich osobników tworzących populację podąża za liderem [19].

Populacja salpów przemieszcza się w d -wymiarowym obszarze dopuszczalnym i jest opisywana przez macierz:

$$(6) \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_d^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_d^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^m & x_2^m & \dots & x_d^m \end{bmatrix}$$

w której: $m=1, 2, 3, \dots, M$ jest numerem salpa, M jest liczbą salpów tworzących populację.

Pierwszym etapem metody optymalizacji jest inicjacja populacji startowej. W opracowanym algorytmie populacja startowa jest tworzona w sposób losowy. Populacja podąża za źródłem pożywienia, które przyjmowane jest jako ekstremum globalne. W metodzie salpów, jako źródło pożywienia przyjmowane jest położenie najlepiej przystosowanego osobnika tworzącego łańcuch. Następnie populacja salpów jest oceniana i porządkowana, aby najlepiej przystosowany salp zajmował pierwszą pozycję w macierzy [20].

Położenie osobnika (x^l) o drugiej najwyższej wartości funkcji celu w kolonii wyznaczane jest:

$$(7) \quad \mathbf{x}^l = \begin{cases} \mathbf{S} + a_1[a_2(\mathbf{x}_{\max} - \mathbf{x}_{\min}) + \mathbf{x}_{\min}] & \text{for } a_3 \geq 0 \\ \mathbf{S} - a_1[a_2(\mathbf{x}_{\max} - \mathbf{x}_{\min}) + \mathbf{x}_{\min}] & \text{for } a_3 < 0 \end{cases}$$

przy czym: \mathbf{S} jest położenie najlepiej przystosowanego salpa, a_1, a_2 są liczbami losowymi wybieranymi z przedziału $(0, 1)$, $\mathbf{x}_{\min}, \mathbf{x}_{\max}$ są wektorami górnych i dolnych wartości zmiennych decyzyjnych.

Wartość współczynnika liczbowego a_1 jest zmieniana w czasie trwania procesu optymalizacji. W k -tej iteracji wartość współczynnika wyznaczana jest według zależności:

$$(8) \quad a_1 = 2e^{-\frac{2k}{k_{\max}}}$$

przy czym k_{\max} jest maksymalną iteracji, zadaną przed rozpoczęciem procesu optymalizacji.

Nowe położenie i -tego salpa w k -tej iteracji obliczane jest według równania:

$$(9) \quad \mathbf{x}_{k+1}^i = \frac{1}{2}(\mathbf{x}_k^i + \mathbf{x}_k^{i-1})$$

Równanie (9) wymaga uwzględnienia równania dynamiki Newtona:

$$(10) \quad \mathbf{x}_k^i = \frac{1}{2}a(\Delta t)^2 + u\Delta t$$

gdzie Δt jest krokiem czasowym, $a=u_f/u_0$, u_0 jest prędkością początkową, u_f jest prędkością końcową.

Formułowanie zadania optymalizacji

Struktura dławika została opisana przy wykorzystaniu trzech zmiennych decyzyjnych: (a) d_1 jest długością szczeliny powietrznej środkowej kolumny dławika, (b) d_2 jest długością szczeliny powietrznej prawej kolumny dławika, (c) z jest liczbą zwojów każdej z trzech cewek dławika. Wszystkie zmienne decyzyjne tworzą wektor $\mathbf{x} = [d_1, d_2, z]^T$. Przedziały zmiennych decyzyjnych przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2. Przedziały zmienności zmiennych decyzyjnych

Zmienna decyzyjna	Maksymalna	Minimalna
d_1 [mm]	4	9
d_2 [mm]	1	5
z	60	90

Dławik o nastrajanej wartości indukcyjności w zależności od konfiguracji załączenia cewek powinien zapewniać poniższe wartości indukcyjności: $L_2=0,75L_1$, $L_3=0,5L_1$, $L_4=0,25L_1$.

Po wykonaniu wielu testowych procesów optymalizacji dla różnych wariantów kryterium optymalności, wykazano, że najlepszą powarzelność końcowego wyniku uzyskano dla funkcji celu o następującej postaci:

$$(11) \quad f(\mathbf{x}) = \lambda \left| \frac{L_2}{L_1} - 0,75 \right| + \lambda \left| \frac{L_3}{L_1} - 0,5 \right| + \lambda \left| \frac{L_4}{L_1} - 0,25 \right|$$

gdzie: λ są współczynnikami wagowymi.

Wyniki obliczeń optymalizacyjnych

Obliczenia optymalizacyjne wykonane zostały dla łańcucha składającego się z 300 osobników (salpów). Jako kryterium zakończenia obliczeń przyjęto maksymalną wartość iteracji procedury ($k_{\max}=30$). Przyjęto wartość współczynników wagowych $\lambda=2$. Procedura optymalizacyjna została uruchomiona 20-krotnie. Spośród wszystkich uruchomień procedury obliczeniowej wyznaczono najlepszą, najgorszą, średnią wartość funkcji celu oraz odchylenie standardowe.

Tabela 3 przedstawia wartości zmiennych decyzyjnych, poszczególnych indukcyjności oraz wartość funkcji celu w wybranych iteracjach procedury optymalizacyjnej procesu optymalizacji zakończonego najmniejszą wartością funkcji celu spośród analizowanych 20-stu procesów.

Tabela 3. Przebieg procesu optymalizacji

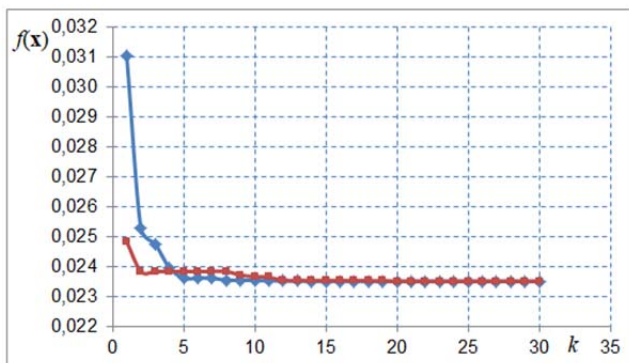
k	d_1	d_2	z	L_1	L_2	L_3	$f(\mathbf{x})$
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[mH]	[mH]	[mH]	[-]
1	5,902	1,918	64	6,459	5,200	2,860	0,03105045
2	6,108	1,927	81	4,957	3,775	2,479	0,02527394
4	6,105	1,924	82	5,082	3,871	2,541	0,02395690
7	6,115	1,925	81	4,957	3,776	2,479	0,02361023
10	6,113	1,925	81	4,958	3,777	2,479	0,02352891
15	6,114	1,925	81	4,958	3,776	2,479	0,02350606
20	6,114	1,925	81	4,958	3,776	2,479	0,02350537
30	6,114	1,925	81	4,958	3,776	2,479	0,02350532

Na podstawie wyników przedstawionych w Tabeli 3 można stwierdzić, że przez dziesięć pierwszych iteracji algorytm optymalizacji przeszukiwał obszar dopuszczalny, a rozwiązanie optymalne zostało wyznaczone po jedenastu iteracjach procesu optymalizacji.

Rysunek 4 przedstawia porównanie krzywych zbieżności dla procesu optymalizacji zakończonego

najlepszą wartością funkcji celu (kolor niebieski) oraz procesu optymalizacji zakończoną najgorszą wartością funkcji celu (kolor czerwony).

Analizując krzywą zbieżności można zaobserwować, że wynik zbliżony do optymalnego został wyznaczony po wykonaniu pięciu iteracji algorytmu salpów. Wartości indukcyjności dla procesu optymalizacji kończącego się najmniejszą wartością funkcji celu uzyskano: $L_1=4,958$ mH, $L_2=3,776$ mH, $L_3=2,479$ mH oraz $L_4=1,239$ mH.



Rys.4. Porównanie krzywych optymalizacji

Na podstawie wyników uzyskanych podczas serii obliczeń optymalizacyjnych wykonano analizę statystyczną. Wyznaczone zostały wartości: minimalna, maksymalna średnia z analizowanej serii obliczeń symulacyjnych oraz wartość odchylenia standardowego (OS). Wyniki analizy statystycznej przedstawiono w Tabeli 4. We wszystkich analizowanych procesach optymalizacji otrzymano jednakowe wartości zmiennych decyzyjnych $d_1=6,114$ mm oraz $d_2=1,925$ mm. W analizowanej serii obliczeń symulacyjnych występowały różnice w wartości liczby zwojów cewek (z). Dlatego do Tabeli 4 dodano również wyniki dla zmiennej z .

Tabela 4. Analiza statystyczna dla serii obliczeń optymalizacyjnych

	Wart. maksymalna	Wart. minimalna	Wart. średnia	OS
$f(x)$	0,02350532	0,02350552	0,023505356	0,000000052
z	79	83	81,533	0,990430402

Wyniki analizy statystycznej udowadniają, że w przypadku optymalizowanej funkcji celu wartość odchylenia standardowego jest bardzo mała. Za każdym razem proces optymalizacji kończy się zbliżoną wartością funkcji celu. Natomiast różnice występują w „optymalnych” wartościach zwojów cewek umieszczonych na kolumnach dostrajanej cewki indukcyjnej.

Następnie opracowano trójwymiarowy połowy model dławika o nastrajanej wartości indukcyjności wykorzystując wyniki optymalizacji. Wykonano obliczenia symulacyjne dla różnych konfiguracji uzwojeń sterujących oraz wyznaczono odpowiadające im wartości indukcyjności. Porównanie wartości indukcyjności uzyskanych w wyniku obliczeń optymalizacyjnych oraz wartości wyznaczonych na podstawie trójwymiarowego modelu MES przedstawia Tabela 5.

Tabela 5. Porównanie wyników obliczeń optymalizacyjnych z wynikami obliczeń połowych

	L_1 [mH]	L_2 [mH]	L_3 [mH]	L_4 [mH]
Optymalizacja	4,958	3,776	2,479	1,239
Obliczenia połowe 3D	5,023	3,792	2,484	1,141

Na podstawie tabeli 5 możemy stwierdzić, że opracowany model zastępczy dławika o nastrajanej

wartości indukcyjności może być zastosowany do obliczeń projektowo-optymalizacyjnych. Największą rozbieżność pomiędzy modelem o parametrach skupionych, a trójwymiarowym modelem MES uzyskano w przypadku indukcyjności L_4 . Różnica indukcyjności L_4 pomiędzy badanymi modelami wyniosła 8,58 %.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono model matematyczny trójkolumnowego dławika o nastrajanej wartości indukcyjnej. Opracowany model matematyczny został wykorzystany do opracowania oprogramowania optymalizacyjnego. Do optymalizacji wykorzystano nowe podejście metody inteligencji roju – metodę salpów. Po wykonaniu wielu obliczeń testowych przyjęto wartość funkcji celu opisaną zależnością (11). Tak zadeklarowana postać funkcji celu zapewniała najlepszą powtarzalność wyników.

Wyniki obliczeń symulacyjnych potwierdzają, że w celu uzyskania różnych wartości indukcyjności, o zadanych stosunkach analizowanego dławika możliwe jest zastosowanie heurystycznego algorytmu optymalizacji.

Opracowany model o parametrach skupionych charakteryzuje się dużą dokładnością. Dokładność opracowanego modelu weryfikowano dla optymalnej struktury dławika przy wykorzystaniu trójwymiarowego modelu połowego.

Podziękowania

Dziękujemy dr hab. inż. Rafałowi Wojciechowskiemu, prof. PP za poświęcony czas, wskazówki oraz pomoc przy opracowaniu matematycznego modelu dławika o zmiennej indukcyjności.

Autorzy: dr inż. Łukasz Knypiński, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, Polska, e-mail: lukasz.knypiński@put.poznan.pl; dr inż. Milena Kurzawa, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, Polska, e-mail: milena.kurzawa@put.poznan.pl.

LITERATURA

- [1] Waindok A., Piekiełny P., Calculation models of the electrodynamic accelerator (railgun), Przegląd Elektrotechniczny, vol. 92, no. 6. pp. 246 - 249, 2016.
- [2] Zhou Z., He Z., Xue G., Zhou J., Rong C., Liu G., Analysis of Magnetic Field Characteristics of a Giant Magnetostrictive Actuator with a Semi-Closed Magnetic Circuit, Actuator, vol. 11, no. 108, pp. 1- 20, 2022.
- [3] Tripathi N., Singh R., Yadav R., Analysis of Speed Control of DC Motor –A review study, International Research Journal of Engineering and Technology, vol. 2, no. 8, pp. 1616 - 1621, 2015.
- [4] Knypiński Ł., Reddy A. V., Venkateswararao B., Devarapalli R., Optimal design of brushless DC motor for electromobility propulsion applications using Taguchi method, Journal of Electrical Engineering vol. 74, no. 2, s. 123-128, 2023.
- [5] Kurzawa M., Zastosowanie algorytmu Lanczos via Pade do wyznaczania wartości parametrów schematu zastępczego dławika, Przegląd Elektrotechniczny, R. 98, nr. 11, s. 243-247, 2022.
- [6] Fu D., Jia Z., Xu Y., Gong J., Gillon F., Bracikowski N., Wu X., Optimization design of a novel flux-switching transverse-flux permanent magnet tube linear motor, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 57, no. 6, pp. 1-5, 2021.
- [7] Nita W., Filipiak S., Optimization of field upgrades of MV power lines using evolutionary algorithms, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 99, no. 11, pp. 26 - 33, 2023.
- [8] Kumar Bhagat S., Ram Babu N., Chandra Saikia L., Chiranjeevi T., Devarapalli R., Garcia Márquez F. P., A Review on Various Secondary Controllers and Optimization Techniques in Automatic Generation Control, Archives of Computational Methods in Engineering, vol. 30, pp. 3081–3111, 2023.

- [9] Knypiński Ł., 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.
- [10] Korani W., Mouhoub M., Review on Nature-Inspired Algorithms, *Operations Research Forum*, vol. 2, pp. 1 -18, 2021.
- [11] Soleimanian Gharehchopogh F., Namazi M., Ebrahimi L., Abdollahzadeh B., *Advances in Sparrow Search Algorithm: A Comprehensive Survey*, *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 30, pp. 427–455, 2023.
- [12] Nagadurga T., Devarapalli R., Knypiński Ł., Comparison of Meta-Heuristic Optimization Algorithms for Global Maximum Power Point Tracking of Partially Shaded Solar Photovoltaic Systems, *Algorithms*, -vol. 16, no. 8, pp. 1-21, 2023.
- [13] Gwóźdź M., Wojciechowski R.M., Possibility of using a tuned inductor in a power device to improve the quality of electricity, *Archives of Electrical Engineering*, vol. 71, no. 4, pp. 1065-1080, 2022.
- [14] Zhang X., Xiao F., Wang R., Fan X. Wang H., Improved calculation method for inductance value of the air-gap inductor, *IEEE China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE)*, Wuhan, China, 2020, pp. 1-6.
- [15] Kulkarni S., Khaparde S., *Transformer Engineering: Design and Practice*. New York, NY, USA: Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [16] Balakrishnan A., Joines W. T., Wilson T. G., Air-gap reluctance and inductance calculations for magnetic circuits using a Schwarz-Christoffel transformation, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 12, no. 4, pp. 654-663, 1997.
- [17] Mirjalili S., Gandomi A. H., Zahra Mirjalili S., Saremi S., Faris H., Mohammad Mirjalili S., *Salp Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems*, *Advances in Eng. Software*, pp. 1-29, 2017.
- [18] Shahid Wasim M., Amjad M., Habib S., Abbas Abbasi M., Rauf Bhatti A., Muyeen S. M., A critical review and performance comparisons of swarm-based optimization algorithms in maximum power point tracking of photovoltaic systems under partial shading conditions, *Energy Reports*, vol. 8, pp. 4871–4898, 2022.
- [19] Karuppusamy L., Ravi J., Dabbu M., Lakshmanan S., Chronological salp swarm algorithm based deep belief network for intrusion detection in cloud using fuzzy entropy, *Journal Metrics: International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields* vol. 35, no. 1, pp. 1 -19, 2021.
- [20] Khajehzadeh M., Iraj A., Majdi A., Keawsawong S., Nehdi M., Adaptive Salp Swarm Algorithm for Optimization of Geotechnical Structures, *Applied Sciences*, vol. 12, pp. 1–23, 2022.