

DOI 10.21008/j.1897-0737.2020.104.0004

Łukasz KNYPIŃSKI*, Mateusz KRÓTKI*, Milena KURZAWA*

OPTIMALIZACJA DŁAWIKA WYGŁADZAJĄCEGO Z ZASTOSOWANIEM METODY ROJU CZĄSTEK

W pracy przedstawiono algorytm oraz oprogramowanie do optymalizacji parametrów strukturalnych dławika wygładzającego. Aplikację komputerową opracowano w środowisku programistycznym Borland Delphi 7.0. Aplikacja komputerowa składa się z nadrzędnej procedury optymalizacyjnej współpracującej z matematycznym modelem urządzenia. W obliczeniach wykorzystano uproszczony model zjawisk w dławiku. Projektowane urządzenie opisano przy wykorzystaniu czterech zmiennych decyzyjnych. Analizowano trzy testowe zadania optymalizacji: zadanie bez ograniczeń oraz dwa zadanie z ograniczeniami. Przedstawiono i omówiono wybrane przykłady obliczeń optymalizacyjnych.

SŁOWA KLUCZOWE: optymalizacja, metoda roju cząstek, metoda funkcji kary zewnętrznej, dławik wygładzający.

1. WPROWADZENIE

We współczesnym procesie projektowania często wykorzystywane są symulacje komputerowe. Symulacja komputerowa umożliwia zastosowanie modeli zjawisk zachodzących w projektowanym urządzeniu o różnym stopniu złożoności. W procesie projektowania przetworników elektromagnetycznych mogą być stosowane złożone modele polowe zjawisk występujących w projektowanym urządzeniu, w których uwzględniane są równania pola elektromagnetycznego, równania zewnętrznych obwodów zasilających, równanie równowagi mechanicznej oraz równania opisujące procesy termiczne zachodzące w projektowanym urządzeniu [1, 2]. Takie modele zjawisk tworzone są przy wykorzystaniu metody elementów skończonych i są one złożone obliczeniowo [3]. Zaś modele o parametrach skupionych lub modele analityczne są zdecydowanie mniej złożone obliczeniowo [4].

Obecnie proces projektowania jest wspomagany komputerowo, coraz częściej decyzje podejmowane przez projektanta są wykonywane automatycznie. Automatyzacja procesu projektowania polega na zastosowaniu algorytmu optymalizacji, którego zadaniem jest „wskazanie” rozwiązania optymalnego. Rozwiązanie optymalne to takie rozwiązanie, które spełnia wszystkie kryteria przyjęte przez projektanta. Zadaniem procedury optymalizacyjnej jest poszukiwanie w kolejnych

* Politechnika Poznańska

iteracjach procesu optymalizacji zmiennych decyzyjnych optymalnego wariantu projektowanego urządzenia.

W projektowaniu przetworników elektromagnetycznych najczęściej wykorzystuje się metody niedeterministyczne [5]. Zaletą tych metod jest sprawne przeszukiwanie przestrzeni rozwiązywanego zadania w celu znalezienia ekstremum globalnego. W grupie tych metod możemy wyróżnić algorytmy proste i algorytmy złożone oparte na interakcjach występujących w grupach osobników (populacjach). Osobniki tworzące populację mogą rywalizować (algorytmy genetyczne) lub współdziałać przekazując wzajemnie informację o położeniu lidera (metoda roju cząstek lub metoda szarych wilków) [6].

Algorytmy niedeterministyczne są bardzo skuteczne i często stosowane do rozwiązania trudnych procesów syntezy przetworników elektromagnetycznych, w których poszukuje się rozwiązania w wielowymiarowych zbiorach zmiennych decyzyjnych [7]. Wśród metod niedeterministycznych często stosowane są metody opracowane na podstawie obserwacji zjawisk zachodzących w środowisku naturalnym (Nature Inspired Algorithm). Najczęściej stosowane są algorytmy genetyczne, oraz metoda roju cząstek zaś zdecydowanie rzadziej stosuje się metodę szarych wilków, algorytm kukułki, algorytm kolonii mrówek czy metodę wzorowaną na echolokacyjnym zachowaniu nietoperzy [12].

Głównym celem pracy jest opracowanie algorytmu oraz oprogramowania wspomagającego proces projektowania dławików wygładzających. W opracowanym algorytmie zastosowano metodę roju cząstek. Rozpatrzono trzy warianty zadań optymalizacji.

2. METODY OPTIMALIZACJI BEZWARUNKOWEJ

Metody optymalizacji bezwarunkowej dzielą się na deterministyczne i niedeterministyczne [8, 9]. W algorytmach deterministycznych minimum globalnego poszukuje się iteracyjnie wzdłuż kolejnych kierunków poszukiwań. Wszystkie operacje matematyczne wykonywane są na pojedynczym punkcie, który w kolejnych iteracjach algorytmu zmienia swoje położenie. Pośród metod deterministycznych wyróżniamy dwa rodzaje metod: bezgradientowe i gradientowe [10].

W przypadku metod **bezgradientowych** kierunki, wzdłuż których poszukujemy optimum są określone według ściśle określonych reguł, przyjętych przed rozpoczęciem procesu optymalizacji. W tej grupie wyróżniamy metody poszukiwań prostych oraz metody z tzw. minimalizacją kierunkową [11]. Natomiast w przypadku metod **gradientowych** kierunek poszukiwań jest tworzony na bieżąco, w każdej iteracji algorytmu optymalizacji. Aktualny kierunek poszukiwań jest wyznaczany na podstawie informacji o gradiencie funkcji celu w osiągniętym punkcie. Za wyjątkiem metody gradientowej prostej, wszystkie metody zawierają procedurę minimalizacji kierunkowej.

W algorytmach niedeterministycznych poszukiwania ekstremum lokalnego w n -wymiarowej przestrzeni nie jest określone żadnymi regułami. W przypadku tych metod do poszukiwania ekstremum wykorzystuje się zbiory punktów. W zależności od zastosowanego algorytmu zbiory punktów nazywane są: populacjami (algorytm genetyczny) [13], rojem cząstek, kolonią nietoperzy [12], a nawet watahą wilków [6]. Metody niedeterministyczne należą do grupy metod heurystycznych, stosowane w przypadkach kiedy zadania optymalizacji nie mogą być rozwiązane przy wykorzystaniu metod deterministycznych. Metody niedeterministyczne pozwalają na znalezienie optimum globalnego z pewnym prawdopodobieństwem. Zastosowanie grupy osobników pozwala na unikanie podczas procesu optymalizacji utknięć w punktach ekstremów lokalnych.

a) Metoda roju cząstek

Metoda roju cząstek (PSO) należy zdaniem autorów współcześnie obok algorytmów genetycznych do najczęściej stosowanych metod optymalizacji. Klasyczna metoda PSO jest bardzo często modyfikowana dla osiągnięcia lepszej zbieżności. Modyfikacje są bardzo często stosowane w przypadku procesów optymalizacji w których rozpatrywanych jest kilka do kilkunastu zmiennych decyzyjnych, a funkcja celu w obszarze dopuszczalnym zawiera kilka ekstremów lokalnych.

Metoda PSO należy do algorytmów stadnych, numeryczny model algorytmu został opracowany na podstawie obserwacji grup zwierząt w ich środowisku naturalnym. Po raz pierwszy metoda ta została przedstawiona w 1995 roku przez R. Eberharta i J. Kennedygo [14]. Metoda w swoim modelu matematycznym wykorzystuje mechanizmy występujące w ławicach ryb i stadach ptaków. Podczas rozwiązywania zadania optymalizacji grupa osobników tworzących rój przemieszcza się w dopuszczalnym obszarze rozpatrywanego zadania w poszukiwaniu ekstremum globalnego. Pojedyncza cząstka w metodzie opisywana jest przez wektor położenia x oraz wektor prędkości v . W metodzie PSO wirtualni osobnicy współpracują pomiędzy sobą. Każdy osobnik posiada informację o położeniu lidera roju – cząstki najlepiej przystosowanej w roju, o najwyższej wartości funkcji celu. W algorytmie prędkość i -tej cząstki w k -tym kroku czasowym wyznacza się następująco:

$$v_k^i = wv_{k-1}^i + c_1r_1(x_L^i - x_{k-1}^i) + c_2r_2(x_G - x_{k-1}^i) \quad (1)$$

przy czym w – współczynnik inercji, c_1 , c_2 – współczynniki uczenia się lub przyspieszenia, r_1 , r_2 – liczby losowe z przedziału $(0, 1)$, x_L^i – najlepsze położenie i -tego osobnika w poprzednich krokach czasowych, x_G – położenie lidera roju.

Aktualną wartość położenia cząstki wyznacza się według zależności:

$$x_k^i = x_{k-1}^i + \left(\frac{v_k^i}{\Delta t} \right) \quad (2)$$

w której Δt – długość kroku czasowego.

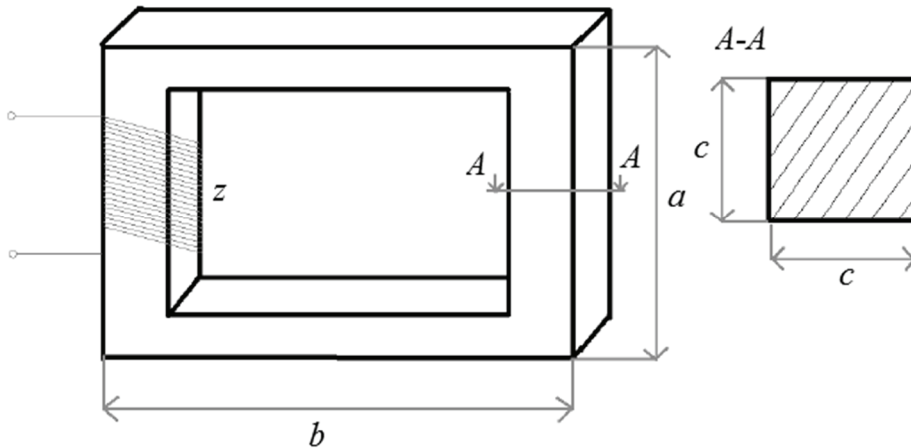
W najnowszych publikowanych pracach dotyczących zastosowania metody roju cząstek w modelu matematycznym bardzo często pomija się parametr Δt przyjmując, że długość kroku jest równa czasowi jednostkowemu [15, 16, 17].

3. FORMUŁOWANIE ZADANIA OPTIMALIZACJI

Rozpatrzono zadanie optymalizacji polegające na zaprojektowaniu dławika wygładzającego stosowanego w sieciach o napięciu znamionowym $U_N = 230$ V. Projektowane urządzenie powinno charakteryzować się bardzo małymi stratami. W procesie optymalizacji narzucone będzie ograniczenie dotyczące masy projektowanego urządzenia.

a) Zbiór zmiennych decyzyjnych

Projektowany dławik składał się z uzwojenia oraz rdzenia wykonanego z materiału ferromagnetycznego. Konstrukcję dławika wygładzającego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Budowa dławika wygładzającego

Strukturę dławika opisano przy pomocy następujących zmiennych decyzyjnych: a – wysokość rdzenia, b – szerokość rdzenia, c – grubość rdzenia, z – liczba zwojów. W procesie optymalizacji zbiór wszystkich zmiennych decyzyjnych tworzy wektor zmiennych decyzyjnych $\mathbf{z} = [a, b, c, z]^T$. Wektor \mathbf{z} jest przesyłany

z procedury optymalizacyjnej do procedury zawierającej model matematyczny dławika.

b) Normowanie zmiennych decyzyjnych

Bardzo często w procesie optymalnego projektowania parametry obiektu mogą mieć różne jednostki miary i różne skale wartości. Zmienne decyzyjne są wówczas nieporównywalne [18]. Dogodne jest zatem sprowadzenie zmiennych decyzyjnych do porównywalnych wartości. W opracowanym algorytmie zmienne decyzyjne unormowano według zasady [19]:

$$s_i = \frac{(z_i - z_{i \min})}{(z_{i \max} - z_{i \min})}, \quad i = 1, 2, 3 \dots n \quad (3)$$

przy czym $z_{i \min}$ oraz $z_{i \max}$ – zadane wartości dolnych i górnych granic zmienności przedziałów zmiennych decyzyjnych z_i .

W przypadku zastosowania normowania według zależności (3) wartości unormowanych zmiennych decyzyjnych s_i zmieniają się w zakresie (0, 1).

c) Definicja funkcji celu

Zadanie optymalizacji polegało na określeniu takich wymiarów strukturalnych rdzenia ferromagnetycznego oraz liczby zwojów uzwojenia, które zapewniają maksymalną wartość indukcyjności własnej oraz najmniejszych strat. Unormowaną funkcję celu dla i -tej cząstki zapisano w następującej postaci:

$$f^i(\mathbf{s}) = \left(\frac{L_0}{L^i(\mathbf{s})} \right) \left(\frac{P^i(\mathbf{s})}{P_0} \right) \quad (4)$$

gdzie: $L^i(\mathbf{s})$ – indukcyjność własna i -tej cząstki, L_0, P_0 – średnie wartości indukcyjności oraz strat mocy uzyskane dla pokolenia początkowego, $P^i(\mathbf{s})$ – straty mocy w żelazie dla i -tej cząstki.

Wartości parametrów charakteryzujących rozpatrywany dławik są wyznaczone na podstawie modelu matematycznego urządzenia opracowanego w środowisku programistycznym Delphi 7.0. W opracowanym algorytmie na podstawie zadanych wartości zmiennych decyzyjnych (wymiarów geometrycznych rdzenia) wyznaczana jest objętość i masa rdzenia dławika wykonanego z materiału ferromagnetycznego. Wartość indukcji magnetycznej B w rdzeniu obliczana jest przy wykorzystaniu wymiarów geometrycznych oraz liczby zwojów w uzwojeniu. Straty w rdzeniu wyznaczone są na podstawie strat jednostkowych dla zastosowanego materiału. W algorytmie indukcyjność dławika obliczana jest przy wykorzystaniu

charakterystyki magnesowania rdzenia, wymiarów geometrycznych oraz liczby zwoi w uzwojeniu.

d) Formulowanie zmodyfikowanej funkcji celu

Podczas rozwiązywania problemów optymalnej syntezy przetworników elektromagnetycznych często konieczne jest uwzględnienie ograniczeń. Ograniczenia są również uwzględniane przy sterowaniu zmiennymi procesów produkcyjnych [20].

W rozpatrywanym zadaniu optymalizacji minimalizowano funkcję $f^i(\mathbf{s})$ przy uwzględnieniu ograniczenia $m_{fe}(\mathbf{s}) \leq m_z$, dotyczącego masy projektowanego dławika. Narzucone ograniczenie zostało unormowane następująco:

$$g(\mathbf{s}) = \frac{m_{fe}(\mathbf{s}) - m_z}{m_z} \quad (5)$$

przy czym m_z – zadana wartość masy urządzenia.

W zagadnieniach technicznych najczęściej ograniczenia uwzględniane są przy wykorzystaniu metody funkcji kary zewnętrznej [11]. W metodzie funkcji kary zewnętrznej, kara za odstępstwo od zadanych ograniczeń jest zapisywana w postaci:

$$Z_m(\mathbf{s}) = a^m g(\mathbf{s}) \quad (6)$$

w której m – numer nadrzędnej iteracji związanej ze zmianami kary, a – podstawa współczynnika kary.

W przypadku zastosowania metody roju cząstek zazwyczaj przyjmuje się wartość współczynnika a z przedziału $(1, 1-1, 6)$ [11].

Jeżeli w rozpatrywanym zadaniu optymalizacji funkcja celu $f(\mathbf{s})$ jest minimalizowana to zmodyfikowana funkcja celu przyjmuje postać:

$$h_m(\mathbf{s}) = \begin{cases} f(\mathbf{s}) & \text{dla } m_{fe} \leq m_z \\ f(\mathbf{s}) + Z_m(\mathbf{s}) & \text{dla } m_{fe} > m_z \end{cases} \quad (7)$$

4. OPTIMALIZACJA DŁAWIKA

Procedurę optymalizacyjną zawierającą metodę roju cząstek opracowano w środowisku programistycznym Delphi 7.0. W celu oceny poprawności opracowanej procedury wykonano obliczenia testowe polegające na poszukiwaniu maksimum lokalnego funkcji dwóch zmiennych.

Procedurę połączono z modelem matematycznym dławika wygładzającego. W celu oceny poprawności opracowanego algorytmu oraz oceny jego efektywności w procesie projektowania dławików przeprowadzono obliczenia optymalizacyjne

dla trzech wariantów zadań optymalizacyjnych: zadania bez ograniczeń oraz dwóch zadań z ograniczeniem dotyczącym masy projektowanego urządzenia.

Wszystkie obliczenia wykonano na roju o liczebności 60 osobników. Przyjęto następujące wartości współczynników metody PSO: $w = 0,5$, $c_1 = 1,2$ oraz $c_2 = 1,6$.

a) Proces optymalizacji bez ograniczeń

W pierwszym analizowanym przypadku wykonano obliczenia bez uwzględnienia ograniczenia dotyczącego masy projektowanego dławika. Podczas obliczeń funkcja celu wyrażona była zależnością (4). Jako kryterium zakończenia obliczeń przyjęto maksymalną liczbę kroków czasowych metody PSO równą $k_{\max} = 30$. Przyjęto następujące wartości przedziałów zmienności zmiennych decyzyjnych $c \in (0, 41)$ mm, $b \in (55, 200)$ mm, $a \in (40, 150)$ mm oraz $z \in (750, 1500)$. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 1. W kolejnych kolumnach tabeli przedstawiono wartości zmiennych decyzyjnych, masy dławika, strat mocy w rdzeniu oraz wartości funkcji celu.

Tabela 1. Wyniki procesu optymalizacji bez ograniczeń.

k	c	a	b	z	m	P	L	$f(s)$
	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[W]	[H]	[-]
1	25,7461	71,834	165,215	1323	2,2058	50,7720	13,128	0,136085
3	29,9960	101,157	186,770	1500	3,6547	35,51980	25,938	0,011746
5	29,9960	101,157	186,770	1500	3,6547	35,51980	25,938	0,011746
10	29,9820	51,7652	176,011	1500	2,8000	27,26378	35,180	0,006647
15	29,9910	40,0420	163,311	1500	2,4556	23,88184	41,216	0,004970
20	29,9975	40,0570	151,657	1500	2,2916	22,26786	44,891	0,004255
25	29,9962	40,0055	147,502	1500	2,2318	21,69074	46,365	0,004013
30	29,9961	40,0057	146,178	1500	2,2312	21,50855	46,851	0,003938

Na podstawie przebiegu procesu optymalizacji możemy stwierdzić, że wynik zbliżony do optymalnego uzyskujemy po dwudziestu krokach czasowych. W kolejnych krokach, zmiany zmiennych decyzyjnych oraz parametrów funkcjonalnych są nieznaczne. W wyniku optymalizacji uzyskujemy dławik o następujących parametrach $m = 2,231$ kg, $P = 21,508$ W oraz $L = 46,851$ H.

b) Proces optymalizacji z uwzględnieniem ograniczenia

Wykonano obliczenia przy uwzględnieniu ograniczenia dotyczącego masy projektowanego dławika. W obliczeniach zastosowano metodę funkcji kary ze-

wewnętrznej. Na podstawie doświadczeń autorów dotyczących rozwiązywania zadań optymalizacji przetworników elektromagnetycznych przyjęto następujące parametry metody funkcji kary zewnętrznej: $a = 1,2$, podstawę współczynnika kary zmieniano co dwa kroki czasowe metody PSO. Założono wartość masy zadanej $m_z = 0,7$ kg. Zmodyfikowaną funkcję celu obliczano według zależności (7). Wyniki optymalizacji dla wybranych kroków czasowych procesu optymalizacji przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki procesu optymalizacji dla $m_z = 0,7$ kg.

k	c	a	b	z	m	P	L	$f(\mathbf{s})_r$
	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[W]	[H]	[-]
1	22,0341	44,9702	130,406	1496	1,1724	32,78696	7,7350	3,466909
4	22,0341	44,9702	130,406	1496	1,1724	32,78696	7,7351	3,466909
5	19,9094	40,0150	124,378	1500	0,9019	37,63715	0,5472	2,946052
10	20,3175	40,0300	70,2592	1500	0,5848	22,50496	1,7120	0,287117
15	22,0775	40,0420	55,0140	1500	0,5601	15,45990	2,0828	0,016210
20	25,1121	40,0510	55,0170	1500	0,6947	11,45435	7,3509	0,003403
25	25,1121	40,0510	55,0170	1500	0,6947	11,45435	7,3509	0,003403
30	25,2190	40,0380	55,0130	1500	0,6994	11,33733	7,5010	0,003301

W wyniku obliczeń, otrzymano urządzenie o masie zbliżonej do masy zadanej. Zmniejszeniu uległy wymiary rdzenia projektowanego dławika. Dla rozpatrywanego zadania wynik zbliżony do optymalnego uzyskano po wykonaniu osiemnastu kroków czasowych.

Następnie wykonano obliczenia optymalizacyjne dla masy zadanej $m_z = 1,4$ kg. Wszystkie parametry procedury optymalizacji pozostawiono takie same jak we wcześniej analizowanych przypadkach. Wyniki obliczeń dla wybranych kroków czasowych przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki procesu optymalizacji dla $m_z = 1,4$ kg.

k	c	a	b	z	m	P	L	$f(\mathbf{s})_r$
	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[W]	[H]	[-]
1	23,3994	55,4738	148,198	1211	1,5544	52,1587	1,8411	0,68333
5	24,3741	40,0150	141,444	1241	1,4697	39,8868	6,9687	0,06476
10	24,5849	40,0300	137,536	1227	1,4561	39,0581	7,4020	0,05971
15	24,9916	40,0420	128,584	1236	1,4128	34,9728	10,882	0,03636
20	25,9141	40,0540	125,828	1284	1,4802	29,3712	19,576	0,01698
25	26,6419	40,0090	116,475	1321	1,4514	24,3542	27,697	0,00995
30	26,9159	40,1130	110,252	1334	1,3992	22,2461	31,551	0,00798

Na podstawie przedstawionych wyników optymalizacji można stwierdzić, że opracowany algorytm działa poprawnie. W przypadku braku ograniczenia otrzymujemy dławik o indukcyjności $L = 46,851$ H, którego masa wynosiła $m = 2,231$ kg. Po przyjęciu ograniczenia dotyczącego masy projektowanego urządzenia $m_z = 1,4$ kg otrzymaliśmy urządzenie o indukcyjność $L = 31,551$ H. Natomiast dla $m_z = 0,7$ kg indukcyjność dławika wyniosła $L = 7,501$ H. Wartość indukcyjności projektowanego dławika jest proporcjonalna do masy ferromagnetycznego rdzenia.

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono algorytm oraz oprogramowanie do projektowania dławika wygładzającego. W module optymalizacyjnym zastosowano niedeterministyczną metodę optymalizacji należącą do grupy algorytmów wzorowanych na zachowaniu organizmów żywych w ich środowisku naturalnym. Opracowane oprogramowanie składa się z nadrzędnej procedury zawierającej metodę roju cząstek współpracującą z modelem matematycznym projektowanego urządzenia.

Na podstawie uzyskanych wyników możemy stwierdzić, że w przypadku zadania optymalizacji bez ograniczenia dotyczącego masy projektowanego urządzenia, otrzymaliśmy urządzenie o największej liczbie zwoi, największych wymiarach geometrycznych rdzenia oraz charakteryzujące się największą indukcyjnością. Przyjęcie bardziej restrykcyjnego ograniczenia dla masy dławika powoduje zmniejszenie wartości jego indukcyjności.

LITERATURA

- [1] Quyang J., Lowther D., A novel adaptation approach for electromagnetic optimization, Archives of Electrical Engineering, vol. 60, no. 4, pp. 473–483, 2011.
- [2] Młynarek P., Kowol M., Analiza polowo-obwodowa silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu częstotliwościowym, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 100, s. 73–76, 2013.
- [3] Belahcen A., Floran M., El-Hadi-Zaim M., Kolondzovski Z., Combined FE and particle swarm algorithm for optimization high speed PM synchronous machine, COMPEL, pp. 475–484.
- [4] Knebl L., Bianchi N., Bacco G., Ondrusek C., Synchronous Reluctance Motor analytical model cross-saturation and magnetization analysis, Przegląd Elektrotechniczny, R. 96, no. 1, pp. 108–112, 2020.
- [5] Knypiński Ł., Adaptation of the penalty function method to genetic algorithm in electromagnetic devices designing, COMPEL, vol. 38, no. 4, pp. 1285–1294, 2019.
- [6] Knypiński Ł., Modified grey wolf method for optimization of PM motors, ITM Web of Conferences, vol. 28, pp. 1–2, 2019.
- [7] Wojciechowski R., Analysis and optimization of an axial flux permanent magnet coreless motor based using superposition principle and genetic algorithm, Archives of Electrical Engineering, vol. 65, no. 3, pp. 601–611, 2016.

- [8] Amoralis E. I., Tsili M. A., Pappas D. G., Kladas A. G., Global transformer design optimization using deterministic and non deterministic algorithm, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, no. 1, pp. 383–394.
- [9] Ming-Hua Lin, Jung-Fa Tai, Chian-Son Yu, A review of deterministic optimization methods in engineering management, Mathematical Problems in Engineering, vol. 212, pp. 34–49, 2012.
- [10] Kusiak J., Danielewska-Tulecka A., Oprochna P., Optymalizacja. Wybrane metody z przykładami zastosowań, Wydawnictwo PWN, Warszawa 2009.
- [11] Knypiński Ł. Optymalizacja silników o magnesach trwałych na podstawie polowo-obwodowego modelu zjawisk elektromagnetycznych, Rozprawa doktorska, s. 200, 2016.
- [12] Knypiński Ł., Optimal design of the rotor geometry of line-start permanent magnet synchronous motor using the bat algorithm, Open Physics, pp. 965–970, 2017.
- [13] Bednarek K., Kasprzyk Ł., Przyspieszenie obliczeń elektrodynamicznych i optymalizacyjnych przez zastosowanie algorytmów równoległych, Przegląd Elektrotechniczny, no. 12, pp. 65–68, 2009.
- [14] Kennedy J., Eberhart R., Particle swarm optimization, Proceedings of International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1995.
- [15] Gao D, Li X., Chen H., Application of improved particle swarm optimization in vehicle car worthiness, Mathematical Problem in Engineering, vol. 2019, doi: 10.1155/2019/8164609, pp. 1–10, 2019.
- [16] Li. Y., Ma. L., Fault diagnosis of power transformer based on improved particle swarm optimization OS-ELM, Archives of Electrical Engineering, vol. 68, no. 1, pp. 161–172, 2019.
- [17] Zhan X., Zou D., Shen X., A novel simple particle swarm optimization algorithm for global optimization, Mathematics, vol. 6, no. 287, doi: 10.3390/math6120287, pp. 1–34, 2018.
- [18] Nermend K., Wielokryterialna metoda wektora preferencji jako narzędzie wspomagające proces decyzyjny, Przegląd Statystyczny, Rocznik LXII, no. 1, s. 93–115, 2015.
- [19] Knypiński Ł., Nowak L., Sujka P., Radziuk K., Application of a PSO algorithm for identification of a parameters of Jiles-Atherton hysteresis model, Archives of Electrical Engineering, vol. 61. No. 2, pp. 139–148, 2012.
- [20] Łopatowska J., Wykorzystanie metody planowania i sterowania produkcją zgodnej z teorią ograniczeń do optymalizacji procesu produkcyjnego, Logistyka, s. 21–26, 2007.

OPTIMIZATION OF THE SMOOTHING CHOKE USING THE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION METHOD

In the article an algorithm and computer software for optimization of structural parameters of smoothing choke is presented. The computer software was developed in the Borland Delphi 7.0 environment. The particle swarm optimization method was applied in the optimization procedure. The designed devices were described by four design variables. The two types of optimization problem were solved: (a) unconstrained optimization problem and (b) the constrained optimization problem. Selected result of computer simulation were presented and discussed.

(Received: 24.01.2020, revised: 09.03.2020)