

Mirosław Dąbrowski, Andrzej Rudeński
Instytut Elektrotechniki, Warszawa

BADANIE STRUKTURY OBSZARU DOPUSZCZALNEGO PRZY OPTYMALIZACJI SILNIKÓW INDUKCYJNYCH

RESEARCH OF FEASIBLE SPACE STRUCTURE IN INDUCTION MOTORS OPTIMIZATION

Abstract: In the paper the trial of research of the feasible space structure in induction motors optimization using non-deterministic methods have been presented. The definitions of the subspaces of search space are proposed and they relative dimensions are estimated by two different of constraints restriction levels. The functions of the elaborated special software SSE (*Solutions Set Explorer*) have been described. The software allows to check, whether being feasible solutions, which have been situated on the n -dimensional straight line between two points which corresponds to the two free selected feasible solutions. Moreover the software show in visual way values of all independent variables on the free selected points. Using this software several sets of feasible solutions, obtained from different non-deterministic procedures applied to the three double-cage induction motors optimization with different constraints restriction levels., have been analyzed.

1. Wstęp

W optymalizacji urządzeń technicznych, w tym również maszyn elektrycznych, coraz szerzej stosuje się metody niedeterministyczne, tj. takie, w których wyniki po każdym powtórzeniu obliczeń tego samego zagadnienia są różne. Dotychczasowe prace autorów koncentrowały się głównie na poszukiwaniu najbardziej efektywnej niedeterministycznej metody optymalizacji. Testowano kilka procedur, a jako kryterium oceny przyjmowano uzyskiwane wartości funkcji celu, zawężenie odchylenia standardowego przy wielokrotnym powtarzaniu obliczeń oraz czas obliczeń.

Złożone, a w pracach badawczych nad przestrzeniami wielowymiarowymi pomijane, jest zagadnienie wyznaczenia kształtu przestrzeni dopuszczalnej. W nielicznych pracach, dotyczących tylko zagadnień dwu- oraz trzypięciowymiarowych, nazywany jest ten obszar „przestrzenią sprawności” [7].

Badania nad metodami rozpoznawania kształtu wielowymiarowej przestrzeni dopuszczalnej są istotne do dalszego rozwoju metod optymalizacji. Pomocne w ich realizacji mogą być rozważania nad topologią i złożonymi właściwościami przestrzeni zależnymi od liczby wymiarów. Pozwoliłoby to na bardziej racjonalny dobór liczby zmiennych decyzyjnych w projektowaniu urządzeń optymalnych.

Jako działania wstępne do rozpoznania kształtu przestrzeni dopuszczalnej można przyjąć posługiwanie się jej przekrojami dwuwymiarowymi. W pracy [7] pokazano, jak można na podstawie

otrzymanego w ten sposób zbioru warstwicz wyznaczyć położenie punktu optymalnego. Ta metoda, jest jednak tym mniej skuteczna im więcej wymiarów ma rozpatrywana przestrzeń.

W tej pracy podjęto próbę zbadania struktury wielowymiarowej przestrzeni rozwiązań dopuszczalnych w optymalizacji silników indukcyjnych za pomocą metod niedeterministycznych.

2. Struktura obszaru poszukiwań

Proponuje się wprowadzenie następujących definicji:

Obszar poszukiwań – wielowymiarowy obszar, w którym poszukuje się rozwiązania optymalnego. Przy n zmiennych niezależnych może być on przedstawiony jako n -wymiarowa „kostka” w zbiorze liczb rzeczywistych \mathfrak{R}^n i wyrażony zależnością:

$$S = \prod_{i=1}^n \langle l_i, u_i \rangle \subseteq \mathfrak{R}^n \quad (1)$$

gdzie: l_i, u_i – odpowiednio dolny oraz górny kres zmienności i -tej zmiennej niezależnej, przy czym niektóre zmienne mogą przybierać tylko wartości dyskretne, np. liczba zwojów i średnice drutu nawojowego.

Obszar rozwiązań dopuszczalnych – obszar oznaczany przez F , w którym są spełnione wszystkie ograniczenia; obszar ten powinien całkowicie mieścić się w obszarze poszukiwań, tj. $F \subseteq S$. Dla oceny „nadmiaru” obszaru po-

szukiwań nad obszarem rozwiązań dopuszczalnych celowe jest wprowadzenie pojęcia stosunku miar tych obszarów $\rho < 1$:

$$\rho = \frac{\nu(F)}{\nu(S)} \quad (2)$$

przy czym: $\nu(S)$ – jest "objętością" (n -wymiarowym rozmiarem) unormowanego obszaru poszukiwań; $\nu(F)$ – jest "objętością" (n -wymiarowym rozmiarem) unormowanego obszaru dopuszczalnego.

W zbiorze liczb rzeczywistych „objętości” obszarów są niedefiniowalne, jednak mogą być umownie mierzone liczbą losowo generowanych rozwiązań wewnątrz obszaru (przy założeniu równomiernego ich rozkładu). Proponuje się nazwanie parametru ρ względną miarą obszaru dopuszczalnego.

Rozmiar obszaru rozwiązań dopuszczalnych jest w zadaniach optymalizacji z ograniczeniami zwykle mały w porównaniu z rozmiarem obszaru poszukiwań. Dlatego już we wstępnej fazie obliczeń celowa jest eliminacja tych wektorów rozwiązań (spośród losowo wygenerowanych), które nie rokują uzyskania rozwiązania dopuszczalnego, np. ze względu na wymiary, które prowadzą do bardzo dużych indukcji w jednym z odcinków obwodu magnetycznego. Obszar, w którym rozwiązania rokują nadzieję na dopuszczalność proponuje się nazwać obszarem rozwiązań akceptowalnych i oznaczać literą A.

Należy podkreślić, że wzajemne relacje pomiędzy rozmiarami obszarów rozwiązań dopuszczalnych F, akceptowalnych A oraz poszukiwań S, zależą głównie od poziomu „restrykcyjności” nałożonych ograniczeń.

3. Ocena rozmiarów obszaru dopuszczalnego

Eksperyment obliczeniowy polegający na losowym wygenerowaniu dużej liczby rozwiązań, sprawdzeniu oraz zarejestrowaniu ich akceptowalności oraz dopuszczalności, pozwala ocenić względne wymiary zdefiniowanych obszarów. Za pomocą opracowanego programu wygenerowano 10-krotnie po 500 000 losowych rozwiązań, dla każdego z nich obliczono funkcję celu i funkcje ograniczeń oraz zarejestrowano liczby naruszeń poszczególnych ograniczeń. Analiza tych danych pozwoliła określić, które z ograniczeń są najbardziej „aktywne”. Następnie powtórzono obliczenia po ich

złagodzeniu. Wyniki obliczeń przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Liczby rozwiązań akceptowalnych, dopuszczalnych oraz względne miary obszaru dopuszczalnego przy różnych wartościach najbardziej aktywnych ograniczeń: n_A – średnia liczba rozwiązań akceptowalnych z 10-ciu obliczeń; n_F – łączna liczba rozwiązań dopuszczalnych w 10-ciu obliczeniach

Silnik	Ograniczenia	n_A	n_F	ρ
7,5 kW $2p=2$	$\eta = 89\%$	389617	1248	$2,5 \cdot 10^{-4}$
	$\eta = 88\%$	389722	17242	$34 \cdot 10^{-4}$
22 kW $2p = 4$	$\Delta \vartheta = 80$ K	234286	2	$4 \cdot 10^{-7}$
	$\Delta \vartheta = 85$ K	234195	66	$132 \cdot 10^{-7}$
90 kW $2p=4$	$\eta = 94\%$;	243518	8	$1,6 \cdot 10^{-6}$
	$\eta = 93\%$;	244168	68	$14 \cdot 10^{-6}$

Funkcja celu obejmowała 15 zmiennych niezależnych. Z tablicy 1 oraz analizy liczb przekroczeń poszczególnych ograniczeń podczas eksperymentu wynika, że rozmiar obszaru dopuszczalnego jest mały w porównaniu z rozmiarem obszaru poszukiwań oraz silnie zależy od stopnia „restrykcyjności” ograniczeń.

4. Źródła danych oraz narzędzia badawcze

W pracach [1-4] badano skuteczność różnych metod niedeterministycznych w optymalizacji silników indukcyjnych. Programy do testowania procedur optymalizacyjnych umożliwiają zapisanie w zbiorze dyskowym całych populacji rozwiązań (lub ich części zawierających wyłącznie rozwiązania dopuszczalne). Zbiory te poza składowymi wektorów rozwiązań, zawierają także tablice podstawowych danych syntetyzowanego silnika, wartości nakładanych ograniczeń oraz zakresy zmienności zmiennych niezależnych.

Posłużono się zbiorami rozwiązań dla kilku silników uzyskanymi ze:

1. strategii ewolucyjnej $(\mu+\lambda)$ -ES, posortowanymi wg niemających wartości funkcji przystosowania;
2. zmodyfikowanego algorytmu genetycznego (modGA) wg [2], posortowanymi jak w punkcie 1;
3. algorytmu immunologicznego CSA wg [1, 4], posortowanymi jak w punkcie 1;
4. algorytmu hybrydowego stanowiącego połączenie strategii ewolucyjnej $(\mu+\lambda)$ -ES i zmodyfikowanego algorytmu Price'a [2],

nieposortowanymi.

W celu analizy tych zbiorów dr A. Rudeński opracował specjalny program o nazwie SSE (*Solution Set Explorer*).

Program SSE tworzy trójwarstwową tablicę, w której każda z warstw ma następujące wymiary: liczba rozwiązań N oraz liczba zmiennych n . W kolejnych wierszach pierwszej warstwy o numerze „0”, są zapisywane wartości zmiennych niezależnych, czyli składowe wektorów rozwiązań odczytane ze źródłowego pliku dyskowego. Liczba wierszy odpowiada liczbie wczytanych rozwiązań. Następnie dla każdego rozwiązania oraz każdej zmiennej, przy jej wartości zmniejszonej oraz powiększonej o 1/1000 zakresu jej zmienności, wykonuje się obliczenia projektowe silnika dla uzyskania wartości funkcji celu oraz parametrów podlegających ograniczeniom. Obliczenia są powtarzane tak długo, aż w uzyskanym rozwiązaniu zostanie naruszone jedno lub więcej ograniczeń. Uzyskane w ten sposób wartości graniczne zmiennych są zapisywane w kolejnych warstwach tablicy, tj. dolne wartości w warstwie „1”, a górne w warstwie „2”. Analiza otrzymanych wyników pozwala określić maksymalne, minimalne oraz średnie szerokości obszaru dopuszczalnego w kierunku każdej ze zmiennych, a także liczbę rozwiązań, w których nawet małe zmiany zmiennych niezależnych (o 1/1000 zakresu zmienności) powodują opuszczenie obszaru dopuszczalnego. Program SSE oblicza również odległości euklidesowe pomiędzy wszystkimi parami punktów (odpowiadających wczytanym rozwiązaniom). Przy liczbie N wczytanych rozwiązań, liczba kombinacji z N rozwiązań po 2 (bez powtórzeń, ponieważ kolejność wybranych punktów jest nieistotna) jest określona wzorem:

$$C_N^2 = \frac{N!}{2! \cdot (N-2)!} \quad (3)$$

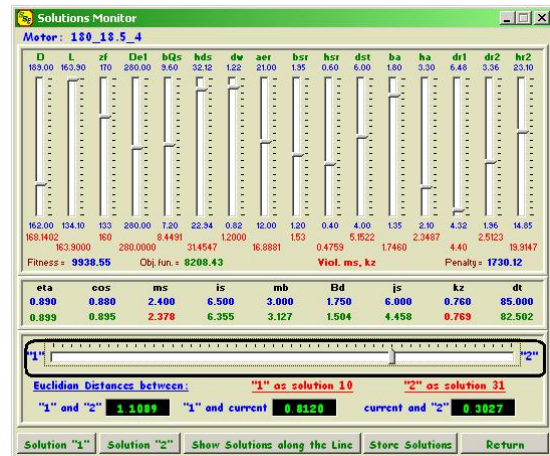
Utworzony w programie SSE zbiór par rozwiązań o liczności określonej wzorem (3) jest sortowany wg niemalejących odległości euklidesowych pomiędzy parami punktów.

Kolejną funkcją programu SSE jest analiza dopuszczalności rozwiązań odpowiadających punktom leżącym na n -wymiarowej prostej łączącej dwa dowolnie wybrane punkty odpowiadające rozwiązaniom dopuszczalnym z wczytanego zbioru. Współrzędne k -tego punktu, czyli składowe wektora zmiennych niezależnych, są obliczane z wzoru:

$$x_j^k = x_j^A + k \cdot \frac{1}{m} (x_j^B - x_j^A) \quad j=1,2,\dots,n; \quad k=1,2,\dots,m \quad (4)$$

przy czym: x_j^A, x_j^B – j -te współrzędne skrajnych punktów A oraz B ; n – liczba zmiennych niezależnych; m – liczba punktów na n -wymiarowej „prostej” łączącej punkty odpowiadające wybranej parze rozwiązań.

Liczba punktów m na „prostej” jest określana przez użytkownika programu i wynosi zwykle kilkaset. Dla każdego z nich są wykonywane obliczenia projektowe, tj. wartości funkcji celu oraz parametrów podlegających ograniczeniom. Przy naruszeniu jednego lub więcej ograniczeń, zapamiętywana jest informacja, które ograniczenia zostały naruszone.

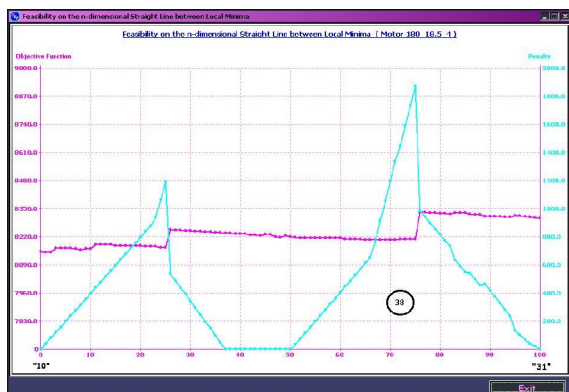


Rys. 1. Widok formularza programu SSE do wizualizacji rozwiązań leżących na n -wymiarowej prostej łączącej dwa wybrane rozwiązania dopuszczalne

Na rysunku 1 przedstawiono widok formularza programu do wizualizacji rozwiązań w wybranych punktach na n -wymiarowej prostej łączącej rozwiązania dopuszczalne. Przesuwanie suwaka (na rysunku 1 otoczonego czarnym prostokątem) jest równoważne przemieszczaniu wzdłuż tej prostej. Suwak może być przesuwany za pomocą myszki, albo za pomocą klawiszy kursora („←” oraz „→”). Pojedyncze naciśnięcie jednego z klawiszy kursora powoduje przesunięcie do kolejnego z m punktów. Jednocześnie są pokazywane (przez 16 suwaków w górnej części formularza) wartości szesnastu zmiennych niezależnych wewnątrz ustalonych zakresów ich zmienności oraz wyróżniane (kolorem czerwonym) ewentualne naruszenia ograniczeń. Przykładowo, dla punktu określonego przez położenie znacznika poziomego suwaka na rysunku 1, naruszone są

ograniczenia dotyczące minimalnej względnej wartości momentu rozruchowego m_s , oraz maksymalnego współczynnika zapełnienia żłobka k_z . Wyświetlane są także wartości funkcji celu, funkcji przystosowania oraz składnika kary za przekroczenie ograniczeń. Ponadto, w dolnej części formularza są wyświetlane odległości euklidesowe pomiędzy aktualnie analizowanym punktem, a punktami skrajnymi.

Program umożliwia przedstawienie na wykresie wartości funkcji celu oraz składnika kary za przekroczenie ograniczeń dla wszystkich punktów leżących na prostej łączącej dwa rozwiązania dopuszczalne. Kliknięcie klawiszem myszki powoduje wyświetlenie na ekranie identyfikatora ograniczenia, które zostało naruszone we wskazanym punkcie. Na rysunku 2 przedstawiono widok formularza programu z wynikami przykładowych obliczeń. Krzywa jaśniejsza przedstawia przebieg składnika kary za przekroczenie ograniczeń, a ciemniejsza – funkcji celu.



Rys. 2. Wartości funkcji celu oraz składnika kary za przekroczenie ograniczeń dla kolejnych punktów leżących na n -wymiarowej prostej łączącej dwa rozwiązania dopuszczalne

Cyfry „3” i „8” widoczne w kółku na rysunku 2, oznaczają, że we wskazanym punkcie zostały naruszone ograniczenia nr 3 oraz 8, tj. maksymalny względny prąd rozruchowy oraz maksymalny współczynnik zapełnienia żłobka. Widoczne skokowe zmiany wynikają ze sposobu obliczania składnika kary i są następstwem zmian wartości funkcji celu. Z kolei skokowe zmiany wartości funkcji celu (na rysunku 2 przebieg ciemniejszy), wynikają z następujących przyczyn:

- ze zmian wartości zmiennych o dyskretnym charakterze zmienności;
- ze skokowych zmian wartości (na skutek dyskretnego poruszania się wzdłuż linii łą-

czącej rozwiązania) jednej lub kilku zmiennych o silnym wpływie na parametry silnika;

- w nielicznych przypadkach z niedokładności obliczeń podczas syntezy silnika spowodowanych obecnością wielu zagnieżdżonych pętli iteracyjnych i skończoną wartością parametru określającego warunek zakończenia iteracji.

Należy podkreślić, że ocena „odległości” punktów wielowymiarowej przestrzeni na podstawie ich odległości euklidesowych nie w pełni odzwierciedla różnice pomiędzy wartościami zmiennych niezależnych. Odległości euklidesowe są obliczane z unormowanych, tj. odniesionych do zakresu ich zmienności, różnic pomiędzy wartościami zmiennych. Ponadto, nie wszystkie zmienne w jednakowym stopniu wpływają na podlegające ograniczeniom parametry projektowanego silnika. Podczas eksperymentów obliczeniowych zaobserwowano, że dla silników o ostrych ograniczeniach średnica wewnętrzna rdzenia stojana, liczba zwojów oraz wymiary żłobków stojana zmieniają się rzadko i nieznacznie, a różnice w poszczególnych punktach dopuszczalnych występują głównie w wartościach zmiennych związanych z klatką pracy oraz szczyrbką żłobka wirnika. Natomiast dla silników o mniej ostrych ograniczeniach, widoczne są różnice wartości zmiennych odpowiadających wymiarom poprzecznym rdzenia stojana. Ponadto, dla przyjętej funkcji kryterialnej praktycznie we wszystkich rozwiązaniach dopuszczalnych występuje maksymalna długość rdzenia, która musi być ograniczona ze względów technologicznych.

5. Wyniki eksperymentów obliczeniowych

Analiza wszystkich par rozwiązań jest praktycznie niemożliwa ze względu na wielką ich liczbę. Przyjęto następujący scenariusz eksperymentów obliczeniowych mających na celu zbadanie struktury oraz kształtu przestrzeni rozwiązań dopuszczalnych:

- A. Sprawdzenie 20 par rozwiązań, równomiernie rozmieszczonych, ze zbioru posortowanego wg niemalejących wartości odległości euklidesowych pomiędzy punktami przestrzeni odpowiadającymi rozwiązaniami;
- B. Sprawdzenie 20 par rozwiązań, losowo wybranych ze zbioru posortowanego wg zasady podanej w punkcie A;

C. Sprawdzenie 20 par rozwiązań, losowo wybranych ze zbioru posortowanego wg niemalejących wartości funkcji celu.

Za pomocą programu SSE poddano analizie cztery przedstawione w poprzednim rozdziale zbiory rozwiązań uzyskane z różnych procedur optymalizacyjnych dla trzech silników indukcyjnych dwuklatkowych.

W zbiorach rozwiązań uzyskanych ze strategii ewolucyjnej $(\mu+\lambda)$ -ES, zmodyfikowanego algorytmu genetycznego (modGA) oraz z algorytmu immunologicznego (CSA), wartości zmiennych niezależnych były zapisane w postaci liczb zmiennoprzecinkowych, tj. były to wartości dokładne. Natomiast zbiory rozwiązań uzyskane z algorytmu hybrydowego $(\mu+\lambda)$ -ES + MPA, zapisano w postaci plików tekstowych, przy czym wartości zmiennych niezależnych zaokrąglono do czterech miejsc po przecinku. Z tego powodu po obliczeniu wartości funkcji celu oraz funkcji ograniczeń w programie SSE, w wielu przypadkach zaobserwowano naruszenia ograniczeń w punktach odpowiadających elementom tych zbiorów. Okoliczność ta świadczy o tym, że niekiedy nawet niewielkie zmiany wartości zmiennych niezależnych wynikające z zaokrągleń powodują opuszczenie obszaru dopuszczalnego. Przekroczenia ograniczeń były jednak bardzo małe (składnik kary poniżej 1 zł przy wartościach funkcji celu od 3300 zł do 27000 zł) i okoliczność ta nie stanowiła przeszkody w ocenie rozwiązań wg przyjętego scenariusza.

W tablicach 2, 3 oraz 4, dla trzech silników o różnych danych znamionowych, przedstawiono zestawienia charakterystycznych parametrów analizowanych zbiorów rozwiązań: minimalne, maksymalne i średnie odległości euklidesowe pomiędzy punktami odpowiadającymi rozwiązaniom oraz minimalne i maksymalne wartości funkcji celu.

Tablica 2. Zestawienie charakterystycznych parametrów zbiorów rozwiązań dla silnika 7,5 kW; $2p = 2$

Algorytm	ED_{\min}	ED_{\max}	ED_{av}	fc_{\min}	fc_{\max}
$(\mu+\lambda)$ -ES	0,1037	1,9643	1,0511	3301,32	3402,22
mod GA	0,0000	0,0592	0,0152	3325,65	3335,91
CSA	0,2685	2,0463	1,2740	3296,23	3521,29
ES+MPA	0,0026	0,3472	0,1599	3308,52	3312,96

Tablica 3. Zestawienie charakterystycznych parametrów zbiorów rozwiązań dla silnika 22 kW; $2p = 4$.

Algorytm	ED_{\min}	ED_{\max}	ED_{av}	fc_{\min}	fc_{\max}
$(\mu+\lambda)$ -ES	0,0473	1,2299	0,4604	9248,65	9270,93
mod GA	0,0000	1,1742	0,3943	9287,27	9294,77
CSA	0,3349	2,1494	1,2086	9402,31	9775,33
ES+MPA	0,0016	1,0698	0,3491	9200,22	9287,10

Tablica 4. Zestawienie charakterystycznych parametrów zbiorów rozwiązań dla silnika 90 kW; $2p = 4$.

Algorytm	ED_{\min}	ED_{\max}	ED_{av}	fc_{\min}	fc_{\max}
$(\mu+\lambda)$ -ES	0,0082	0,9453	0,3726	27406,29	27417,79
mod GA	0,0000	0,0944	0,0128	27521,46	27580,01
CSA	0,2775	1,9731	1,1672	27417,02	28293,20
ES+MPA	0,0001	0,7139	0,3802	27351,56	27594,44

W tablicy 5 przedstawiono liczby par rozwiązań, pomiędzy którymi stwierdzono naruszenie ograniczeń odniesione do liczb par sprawdzanych, dla różnych silników oraz zbiorów rozwiązań uzyskanych z różnych procedur optymalizacyjnych. Podane wyniki dotyczą tylko eksperymentu B.

Tablica 5. Zestawienie wyników dla różnych silników oraz zbiorów rozwiązań uzyskanych z różnych algorytmów.

Algorytm Silnik	$(\mu+\lambda)$ - ES	mod GA	CSA	$(\mu+\lambda)$ -ES + MPA
7,5 kW; $2p = 2$	8 / 20	0 / 20	20 / 20	2 / 20
22 kW; $2p = 4$	0 / 20	0 / 20	20 / 20	17 / 20
90 kW; $2p = 4$	0 / 20	0 / 20	16 / 20	14 / 20

6. Podsumowanie

W przedłożonej pracy oceniano:

- 1) liczbę i wielkość przekroczeń ograniczeń pomiędzy punktami odpowiadającymi minimum lokalnym funkcji przystosowania;
- 2) liczbę minimów lokalnych funkcji przystosowania;
- 3) różnice wartości składowych wektora zmiennych niezależnych w poszczególnych minimach lokalnych;

- 4) różnice w wartościach funkcji celu w minimach lokalnych.

W wyniku przeprowadzonych testów A, B oraz C zaobserwowano charakterystyczne cechy zbiorów rozwiązań uzyskanych z różnych procedur optymalizacyjnych.

- W zbiorach rozwiązań dopuszczalnych uzyskanych ze strategii ewolucyjnej ($\mu+\lambda$)-ES, przekroczenia ograniczeń występują tylko przy mniej ostrych ograniczeniach. Wtedy obserwuje się występowanie minimów lokalnych ze znacznie różniącymi się wartościami zmiennych niezależnych. Przy ostrych ograniczeniach różnice wartości składowych wektorów rozwiązań są małe, a ograniczenia pomiędzy punktami nie są naruszone. Świadczy to o nie wykryciu przez algorytm minimów lokalnych.
- W zbiorach rozwiązań dopuszczalnych uzyskanych ze zmodyfikowanego algorytmu genetycznego (modGA), pomiędzy punktami nie występują przekroczenia ograniczeń. Wartości zmiennych niezależnych dla wszystkich rozwiązań różnią się nieznacznie, a różnice dotyczą tylko tych zmiennych, które mają niewielki wpływ na parametry silnika. Obraz przestrzeni rozwiązań dopuszczalnych jest mało zróżnicowany.
- W zbiorach rozwiązań dopuszczalnych uzyskanych z algorytmu immunologicznego (CSA) w większości przypadków występują naruszenia ograniczeń pomiędzy punktami. Oznacza to, że wykrywana jest duża liczba ekstremów lokalnych różniących się wyraźnie składowymi wektora zmiennych niezależnych – zbiory rozwiązań są zróżnicowane. Przypadki braku naruszeń ograniczeń dotyczą punktów o zbliżonych wartościach funkcji celu i małych odległościach euklidesowych, tj. punktów odpowiadających jednemu ekstremum lokalnemu.
- W zbiorach rozwiązań dopuszczalnych uzyskanych z algorytmu hybrydowego ($\mu+\lambda$)-ES + MPA, przy słabszych ograniczeniach występują pojedyncze minima lokalne (różne wartości zmiennych), a przekroczenia ograniczeń pomiędzy punktami są niewielkie. Przy bardziej ostrych ograniczeniach liczba minimów lokalnych jest większa, a naruszenia ograniczeń pomiędzy punktami nie zależą od ich odległości euklidesowych. Często punkty bliskie sobie różnią się znacznie wartościami zmiennych niezależnych, a punkty bardziej odległe – tylko nieznacznie.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że w optymalizacji silników indukcyjnych przy dużej liczbie zmiennych niezależnych obszar rozwiązań dopuszczalnych wydaje się być niespójny. Świadczą o tym wyniki badań zbiorów rozwiązań uzyskanych z algorytmów immunologicznego (CSA) oraz hybrydowego. Zmodyfikowany algorytm genetyczny (modGA), a przy ostrych ograniczeniach także strategia ewolucyjna ($\mu+\lambda$)-ES, wykazują zbyt słabe właściwości eksploatacyjne do wykrycia obecności licznych minimów lokalnych.

7. Literatura

- [1] Dąbrowski M., Rudeński A.: *Effectiveness comparison of non-evolutionary nondeterministic methods in design of electrical machines*. Archives of Electrical Engineering, w druku
- [2] Dąbrowski M., Rudeński A.: *Application of non-deterministic hybrid method for optimization of three-phase induction motors by increased number of independent variables*. Poznan University of Technology Academic Journals, No. 52, pp. 145-157
- [3] Rudeński A.: *Badanie efektywności niedeterministycznych metod optymalizacji w projektowaniu silników indukcyjnych*. Proc of XVII International Symposium on Electrical Machines SME 2007, Poznań, ss. 309-312
- [4] Rudeński A.: *Badanie skuteczności algorytmu immunologicznego w optymalizacji silników indukcyjnych*. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 12/2008, ss. 96-99
- [5] J. Zabrodzki, S. Budkowski, *Metody wyznaczania obszarów sprawności*. Rozprawy Elektrotechniczne, Z. 1, ss. 15-40, 1974

Autorzy

Prof. dr hab. inż. Mirosław Dąbrowski,
e-mail: mirosław.dabrowski@put.poznan.pl
Politechnika Poznańska,
Instytut Elektrotechniki Przemysłowej,
ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań

Dr inż. Andrzej Rudeński,
e-mail: a.rudenski@iel.waw.pl
Instytut Elektrotechniki,
Zakład Maszyn Elektrycznych,
ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa