

Konrad DUDZIAK*, Krzysztof STAWICKI*, Andrzej BRYKALSKI*

WYKORZYSTANIE SPRZĘŻONYCH PAKIETÓW OBLICZENIOWYCH COMSOL MULTIPHYSICS® I MATLAB® DO OPTYMALIZACJI W WYBRANYCH ZAGADNIENIACH POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO

W artykule autorzy opisują proces modelowania czujnika indukcyjnego i optymalizacji wybranych parametrów oraz wymiany danych między pakietami obliczeniowymi COMSOL Multiphysics [5] i Matlab [6]. W zaprezentowanych przypadkach program COMSOL, wykorzystujący Metodę Elementów Skończonych (MES), posłużył do obliczania pola elektromagnetycznego, natomiast w programie Matlab została przeprowadzona optymalizacja z wykorzystaniem Algorytmu Genetycznego (AG).

Układ wykorzystany w pracy składa się z trzech współosiowych cewek, umieszczonych w pewnej odległości od siebie (rys. 3). Jest to przykład przetwornika wiroprądowego, który ma służyć do określania rodzaju materiału z jakiego zbudowany jest badany obiekt, umieszczany pomiędzy cewkami. W tym modelu optymalizacji podlegają wymiary geometryczne cewek. Funkcja celu została zdefiniowana w taki sposób, aby napięcie różnicowe między cewkami odbiorczymi było możliwie najbliższe zera, gdy nie ma obiektu.

SŁOWA KLUCZOWE: badania wiroprądowe, algorytm genetyczny, optymalizacja, metoda elementów skończonych (MES).

1. WPROWADZENIE

Czasy, gdy podstawowym narzędziem pracy inżyniera był ołówek i papier minęły. Dziś nieodzownym „towarzyszem” jest komputer z odpowiednim oprogramowaniem. Mając powyższe na uwadze, autorzy w niniejszej pracy postanowili zająć się tematem współpracy różnych programów komputerowych, służących do szeroko pojętych obliczeń w elektrotechnice. Konieczność współpracy kilku programów, związana jest z tym, że żaden z obecnych na rynku pakietów oprogramowania nie zapewnia całościowej realizacji większości problemów inżynierskich lub wymaga wielu skomplikowanych działań, aby te problemy rozwiązać.

* Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

2. OPROGRAMOWANIE

2.1. COMSOL Multiphysics®

Wykorzystany do badań program COMSOL ma za zadanie przeprowadzenie symulacji zachowania modelu. W większości przypadków symulacja sprowadza się do rozwiązywania równań różniczkowych opisujących zjawiska fizyczne jakie zachodzą w modelowanym układzie, dla różnych konfiguracji przestrzennych i materiałowych. Do rozwiązywania tych równań stosowana jest Metoda Elementów Skończonych (MES) [2, 4]. W pracy posłużono się modułem AC/DC programu COMSOL, który obejmuje badanie stacjonarnych i dynamicznych pól elektrycznych i magnetycznych, zarówno w obszarach 2D, jak i 3D. Do obliczeń wykorzystuje on równania wywodzące się z równań Maxwella, uwzględniając właściwości materiałowe, położenie źródeł (wzbudzenia) oraz warunki graniczne. Równania te są rozwiązywane numerycznie za pomocą wspomnianej wcześniej metody. Mogą one być rozpatrywane jako statyczne albo w dziedzinie częstotliwości lub czasu. Osobnym, dodatkowo płatnym modułem jest moduł, który umożliwia optymalizację kilkoma metodami, przy czym nie zaimplementowano w nim metody algorytmów genetycznych.

2.2. MATLAB®

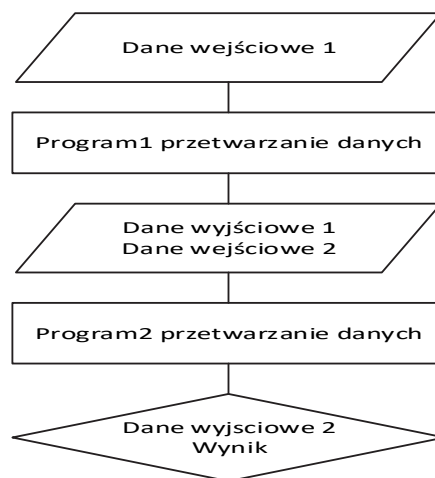
Drugim użytym w przeprowadzonych symulacjach programem jest MATLAB. Jest to pakiet programistyczno-obliczeniowy służący do tworzenia i rozwijania algorytmów, akwizycji i przetwarzania danych, analizy i wizualizacji danych oraz do przeprowadzania obliczeń numerycznych. W programie MATLAB wykonano optymalizację badanego obiektu z zastosowaniem wbudowanego narzędzia „*Optimization Toolbox*”, z którego wybrano algorytm genetyczny.

2.3. Łączenie programów

W wielu przypadkach, aby rozwiązać dany problem, należy połączyć ze sobą działanie różnych programów. Należy z tego korzystać, gdy jeden program nie jest w stanie sprostać konkretnemu wyzwaniu lub, gdy łączenie daje wymierne korzyści, na przykład w postaci skrócenia czasu obliczeń lub zwiększenia ich dokładności.

Rysunek 1 przedstawia najprostszy sposób łączenia ze sobą dwóch programów. Program numer 1 otrzymuje dane wejściowe numer 1, przetwarza je, a wynikiem tej operacji są dane wyjściowe 1/dane wejściowe 2. Są to te same dane, lecz dla programu 1 są one danymi wyjściowymi (wynikiem działania

programu), a dla programu numer 2 są to dane wejściowe. Następnie program numer 2 przetwarza te dane, czego rezultatem są dane wyjściowe 2, będące jednocześnie wynikiem całości obliczeń sprzęgniętych ze sobą programów numer 1 i 2. Wprowadzanie danych do programów może się odbywać ręcznie lub może być zautomatyzowane dzięki bezpośredniej wymianie danych między programami.



Rys. 1. Diagram łączenia programów

Wymianę informacji pomiędzy programami COMSOL i MATLAB zapewnia moduł LiveLink z pakietu COMSOL. Jest to podstawowe narzędzie do sprzęgnięcia programu COMSOL z oprogramowaniem MATLAB. Oparty jest on o środowisko Java i działa w technologii klient-serwer. Dzięki niemu możliwe jest generowanie z programu COMSOL skryptów dla programu MATLAB – tak zwanych „m-plików”. Korzystając z LiveLinka można w oknie poleceń MATLABA wykonywać te same funkcje i operacje jakie wykonujemy w COMSOLU.

Dzięki użyciu modułu LiveLink w MATLABIE, możliwe jest ustawienie właściwości modelu, między innymi takich jak rodzaj materiału oraz warunki brzegowe charakterystyczne dla rozwiązywanych zagadnień. Ponieważ model eksportowany jest do m-pliku, można w nim zaimplementować pętle, lub wyrażenia warunkowe typu *if*, *switch* oraz inne działania i polecenia znane z MATLABA. Kolejnym ważnym elementem jest dostęp do siatki, utworzonej w COMSOLU do obliczeń MES, którą można edytować, jak również uzyskać dostęp do wyników w punktach węzłowych lub dowolnych miejscach przestrzeni.

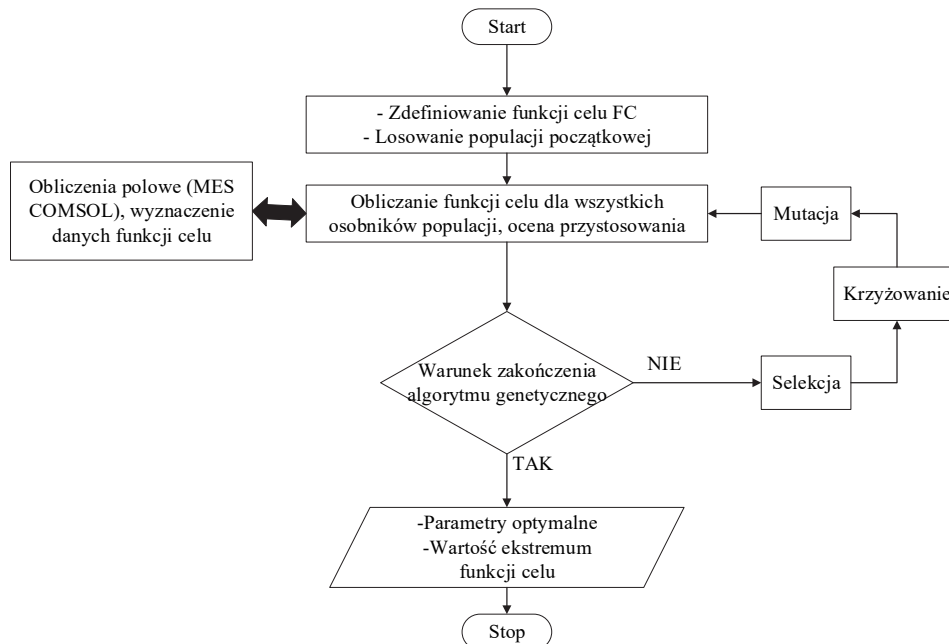
Mimo dość obszernych możliwości, jakie daje moduł LiveLink™ for MATLAB® występuje jedna, poważna wada tego rozwiązania. Możliwy jest jedynie

eksport modelu z programu COMSOL do programu MATLAB. Dalsza praca z modelem wymaga uruchomienia środowiska „COMSOL with MATLAB”, który co prawda umożliwia pracę w MATLABIE, jednak w tle jest uruchomiony serwer COMSOLA. Dostarcza on polecenia i solwery z pakietu COMSOL do środowiska MATLAB. Niestety taka konfiguracja powoduje spowolnienie obliczeń i wydłużenie ich czasu.

3. BADANIA

Celem przeprowadzonych symulacji jest dobranie optymalnych wymiarów badanego modelu. Optymalizowanym modelem jest model przetwornika wirowoprądowego służącego do rozpoznawania materiału, z jakiego wykonany jest badany obiekt. Przetwornik składa się ze wzбудnika zasilanego prądem przemiennym o częstotliwości 200 Hz, którym jest cewka powietrzna (cewka wzbudzająca). W pewnej odległości od niej znajdują się kolejne dwie cewki powietrzne, wykorzystywane jako cewki odbiorcze.

Zadanie optymalizacyjne polega na znalezieniu wymiarów geometrycznych cewek odbiorczych z użyciem algorytmu genetycznego. Schemat algorytmu optymalizacyjnego przedstawia rysunek 2.

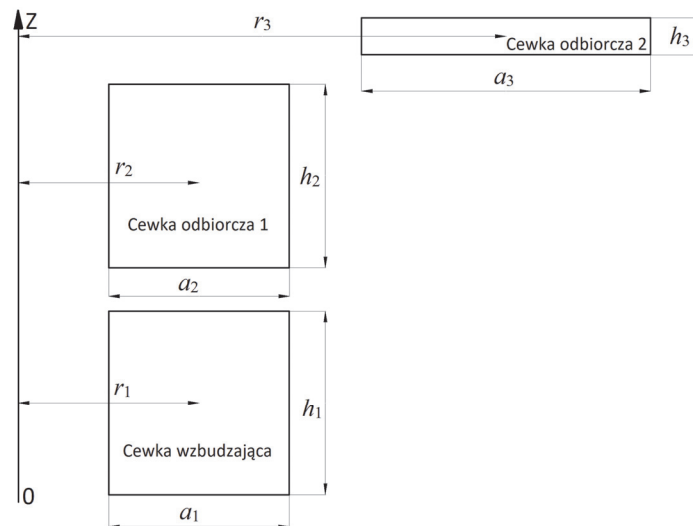


Rys. 2. Schemat zastosowanego algorytmu

Cewka wzbudzająca jest zasilana prądem przemiennym o określonej amplitudzie i częstotliwości, generując zmienne pole magnetyczne. W niewielkiej odległości od niej znajdują się dwie cewki odbiorcze, połączone różnicowo. Pole magnetyczne wytworzone w cewce wzbudzającej powoduje indukowanie się napięcia w cewkach odbiorczych. Jeśli w przestrzeń między cewką wzbudzającą a cewkami odbiorczymi wprowadzi się materiał o określonych parametrach, to zaburzy on pole magnetyczne i zmieni wartość zaindukowanego napięcia w cewkach odbiorczych. Analiza sygnału otrzymywanego na cewkach odbiorczych umożliwi identyfikację materiału pod względem jego parametrów elektrycznych, magnetycznych i geometrycznych. Celem optymalizacji jest uzyskanie możliwie najmniejszego napięcia różnicowego między cewkami odbiorczymi w sytuacji, gdy między cewką wzbudzającą a cewkami odbiorczymi nie ma żadnego obiektu, a występuje jedynie powietrze.

3.1. Budowa modelu, wstępna symulacja

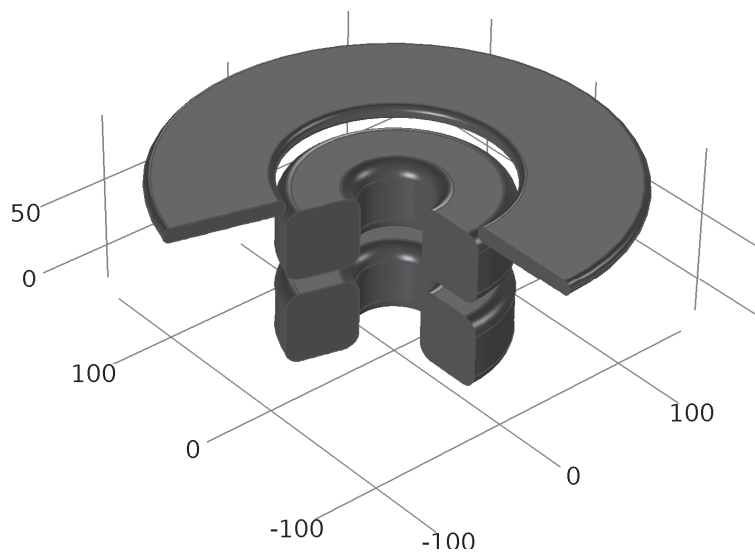
W pierwszym etapie prac opracowano model w układzie osiowo-symetrycznym (rys. 3 i 4). Założono że badane cewki są cewkami toroidalnymi. Szerokość cewek, oznaczona jako a_i rozumiana jako różnica między promieniem zewnętrznym cewki a jej promieniem wewnętrznym. Średni promień cewki to odległość od środka geometrycznego cewki do osi symetrii układu. Wymiary poszczególnych elementów zapisano w postaci zmiennych, których wartości zostały zamieszczone w tabeli 1.



Rys. 3. Model projektowanego przetwornika w przekroju yz

Tabela 1. Wstępne wymiary modelu.

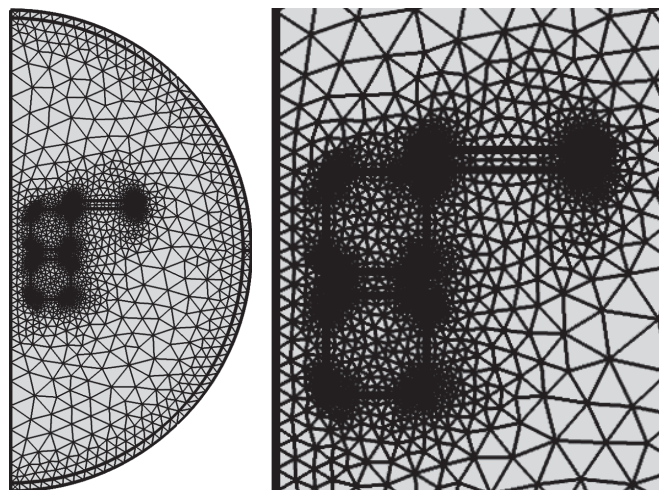
Parametr	Wartość	Opis
a_1	0,05 m	szerokość uzwojenia cewki wzbudzającej
h_1	0,05 m	wysokość uzwojenia cewki wzbudzającej
n_1	$a_1 \cdot h_1 \cdot k_c$	liczba zwoi cewki wzbudzającej
r_1	0,05 m	średni promień cewki wzbudzającej
a_2	0,05 m	szerokość uzwojenia cewki odbiorczej 1
h_2	0,05 m	wysokość uzwojenia cewki odbiorczej 1
n_2	$a_2 \cdot h_2 \cdot k_c$	liczba zwoi cewki odbiorczej 1
r_2	0,05 m	średni promień cewki odbiorczej 1
a_3	0,08 m	szerokość uzwojenia cewki odbiorczej 2
h_3	0,01 m	wysokość uzwojenia cewki odbiorczej 2
n_3	$a_3 \cdot h_3 \cdot k_c$	liczba zwoi cewki odbiorczej 2
r_3	$r_2 + a_2/2 + a_3/2$	średni promień cewki odbiorczej 2
k_c	0,86 [1/m ²]	współczynnik wypełnienia uzwojeń cewki



Rys. 4. Model badanego przetwornika w 3D

Rysunek 4 przedstawia geometrię modelu zbudowanego w programie COM-SOL, ze wstępnie przyjętymi parametrami – jak w Tabeli 1. Wymiary na rysunku są podane w milimetrach.

Dla potrzeb symulacji założono, że cewki zbudowane są z miedzi oraz przyjęto siatkę elementów skończonych przedstawioną na rysunku 5.



Rys. 5. Model z wygenerowaną siatką elementów skończonych

W tabeli 2 zamieszczono zespolone wartości napięć otrzymanych na cewkach po przeprowadzeniu eksperymentu numerycznego dla losowych wstępnie przyjętych parametrów geometrycznych.

Tabela 2. Wartości zespolone napięć na cewkach w badanym modelu.

Napięcie [V], cewka wzbudzająca	Napięcie V_1 [V], cewka odbiorcza 1	Napięcie V_2 [V], cewka odbiorcza 2
$-3.8734-5.1140i$	$-0.42926-0.22900i$	$-0.089411-0.054972i$

3.2. Optymalizacja modelu, AG

Proces optymalizacji w przedstawianej pracy dotyczy niektórych wymiarów geometrycznych cewek. Celem optymalizacji jest osiągnięcie możliwie najniższego napięcia (minimum) dla połączenia różnicowego cewek odbiorczych. Najlepszym wynikiem byłoby osiągnięcie różnicy napięć wynoszącej zero [1].

Proces optymalizacji prowadzi do rozwiązania pewnego zagadnienia odwrotnego. Taki rodzaj zagadnień może nie posiadać rozwiązania, może posiadać rozwiązanie lub też posiadać nieskończenie wiele rozwiązań. W przypadku modelu rozpatrywanego w niniejszej pracy, ponieważ optymalizacja dotyczy będzie wymiarów geometrycznych, konieczne jest założenie dla nich pewnych przedziałów, w których poszukiwane będzie minimum. W związku z wprowadzeniem tych przedziałów, będzie to optymalizacja z ograniczeniami.

Optymalizacji poddane zostaną następujące parametry:

a_2 – szerokość cewki odbiorczej 1,

h_2 – wysokość cewki odbiorczej 1,

a_3 – szerokość cewki odbiorczej 2,

h_3 – wysokość cewki odbiorczej 2.

oraz parametry modelu zależne od powyższych, między innymi takie jak:

n_2 – liczba zwoi cewki odbiorczej 1,

n_3 – liczba zwoi cewki odbiorczej 2,

r_3 – promień cewki odbiorczej 2,

z_3 – położenie w osi Z cewki odbiorczej 2,

$$n_2 = a_2 \cdot h_2 \cdot 0,86 \quad (1)$$

$$n_3 = a_3 \cdot h_3 \cdot 0,86 \quad (2)$$

$$r_3 = r_2 + \frac{a_2}{2} + \frac{a_3}{2} \quad (3)$$

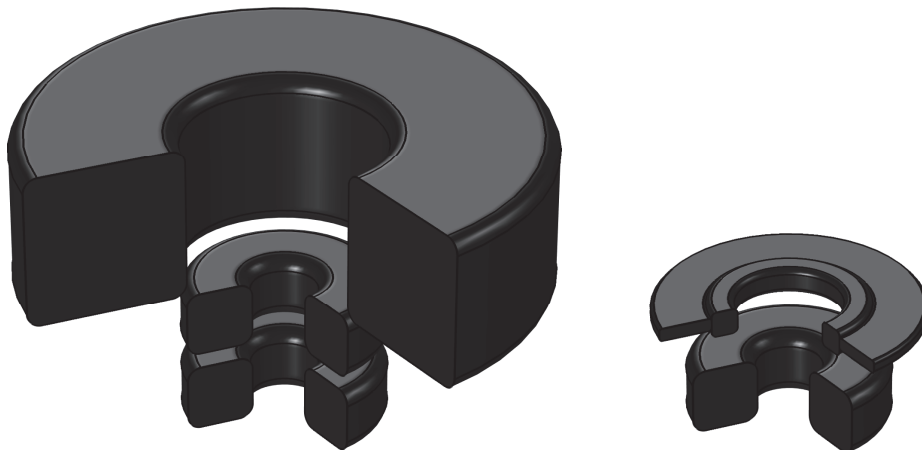
$$z_3 = \frac{a_1}{2} + \frac{h_3}{2} + a_2 + 13 \quad (4)$$

Ograniczenia dla poszczególnych parametrów zawarte są w tabeli 3.

Tabela 3. Granice parametrów optymalizacji.

	a_2 [mm]	h_2 [mm]	a_3 [mm]	h_3 [mm]
granica dolna	20	20	40	10
granica górna	50	50	120	120

Graficzne przedstawienie zakresów w jakich będą się zmieniać wymiary geometryczne cewek odbiorczych pokazane jest na rys. 6.



Rys. 6. Wymiary maksymalne i minimalne projektowanych cewek

Aby można było przeprowadzić proces optymalizacji, konieczne jest wyznaczenie funkcji celu. Oprogramowanie MATLAB umożliwia poszukiwanie w procesie optymalizacji minimum zadanej funkcji [3]. Założona funkcja celu w rozpatrywanym przypadku przybrała następującą postać:

$$V_{diff} = |V_1 - V_2| \quad (5)$$

gdzie: V_{diff} – napięcie różnicowe cewek odbiorczych, V_1 – napięcie na cewce odbiorczej 1, V_2 – napięcie na cewce odbiorczej 2.

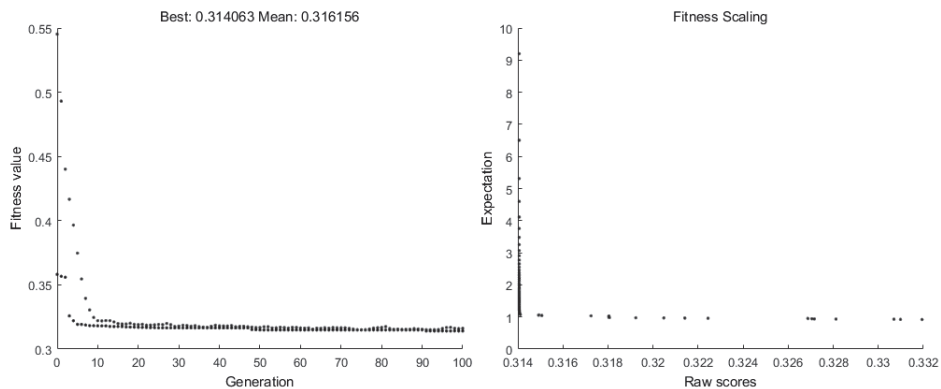
3.2. Wyniki optymalizacji

Wyniki procesu optymalizacji z użyciem algorytmu genetycznego przedstawia tabela 4.

Tabela 4 Wyniki dla serii obliczeń: populacja = 100, liczba pokoleń = 100.

Lp.	a_2 [mm]	h_2 [mm]	a_3 [mm]	h_3 [mm]	Wartość funkcji celu [V]
1.	20,008	20,029	79,971	49,991	0,361277
2.	20	20,058	79,965	49,976	0,361373
3.	20,014	20	48,854	83,865	0,314060
4.	20,033	20,041	48,93	83,98	0,314473
5.	20,007	20,025	40,014	84,161	0,314091

Wyniki zebrane podczas obliczeń wskazują wyraźnie, że optymalizacja dla pierwszej cewki odbiorczej jest na założonej dolnej granicy parametrów a_2 , h_2 . Dla tych parametrów optymalizacyjnych niemożliwym jest zatem uzyskanie napięcia różnicowego między cewkami odbiorczymi równego zero.



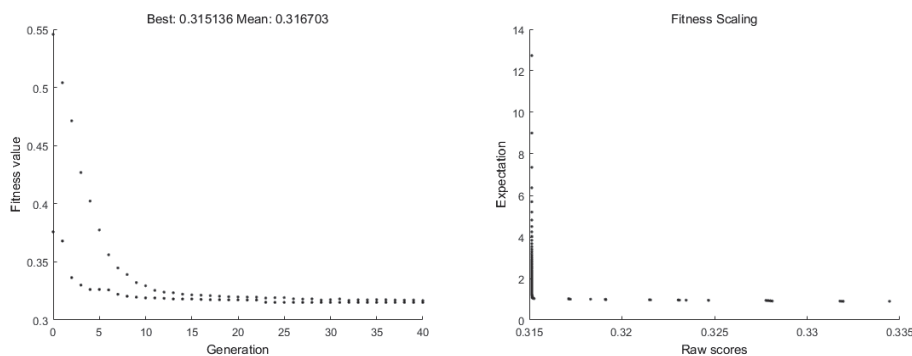
Rys. 7. Wartości funkcji celu

Analizując otrzymane wyniki można zauważyć (rys. 7), że od czterdziestego pokolenia wartość funkcji celu zmienia się w już bardzo niewielkim stopniu. Kolejne iteracje nie wnoszą istotnych zmian do wyniku końcowego, a jedynie wydłużają czas obliczeń. Mając powyższe na uwadze, kolejną serię obliczeń przeprowadzono dla następujących założeń: liczba osobników w populacji początkowej 200, liczba pokoleń 40. Sumaryczne wyniki umieszczono w tabeli 5.

Tabela 5. Wyniki dla serii obliczeń: populacja = 200, liczba pokoleń = 40.

Lp.	a_2 [mm]	h_2 [mm]	a_3 [mm]	h_3 [mm]	Wartość funkcji celu [V]
1.	20,071	20,08	40,037	83,713	0,315136
2.	20,071	20,215	40,361	83,963	0,315683
3.	20,071	20,132	92,623	80,713	0,340808
4.	20,071	20,132	40,361	83,965	0,315354
5.	20,127	20,235	40,034	91,112	0,318437

Również i w tym przypadku nie udało się osiągnąć napięcia różnicowego wynoszącego zero. Tak jak i w przypadku poprzedniej serii obliczeń, wyniki optymalizacji dla parametrów a_2 , h_2 , są bliskie ich wartościom granicznym. Można zatem wnioskować, że bez zmiany ograniczeń dla tych parametrów minimum funkcji celu wynosi $\approx 0,31$.



Rys. 8. Wartość funkcji celu w kolejnych pokoleniach, Rozkład wartości funkcji celu

Kolejnym etapem prac była zmiana wartości parametrów granicznych oraz wielkości populacji startowej i liczby iteracji (pokoleń). Wyniki zamieszczono w tabeli 6. W nawiasach podano ograniczenia dolne i górne dla optymalizowanych wartości.

Tabela 6. Wyniki obliczeń dla zmienionych wartości ograniczeń.

Wielkość populacji startowej	Liczba pokoleń	a_2 [mm] (10–35)	h_2 [mm] (10–40)	a_3 [mm] (35–120)	h_3 [mm] (35–120)	Wartość funkcji celu [V]
10	10	16,411	10,5	85,192	83,138	0,247772
15	5	10,710	16,367	73,180	108,22	0,195940
5	15	11,982	12,746	56,343	94,131	0,188394
15	15	11,129	11,469	52,030	108,81	0,157752
25	5	11,988	14,816	50,962	90,945	0,202119
5	25	11,482	13,246	56,343	95,131	0,184832

4. WNIOSKI

Jak wynika z obliczeń, których rezultaty zamieszczamy w tabeli 6, zmiana granic poprawiła wyniki optymalizacji. Wartość funkcji celu zdecydowanie zmalała nawet o połowę w porównaniu z obliczeniami z poprzednimi ograniczeniami. Również w tym przypadku wartości optymalizowanych danych, a_2 , h_2 , znalazły się bardzo blisko wartości granicznych.

Na podstawie wyników z przeprowadzonych obliczeń można zauważyć, że osiągnięcie zerowej różnicy napięć między cewkami odbiorczymi wymaga optymalizacji nie tylko wymiarów poprzecznych, ale również innych parametrów, między innymi: promienia cewki, odległości między cewkami oraz ich wzajemnego położenia.

Autorzy podejmując temat współpracy programów komputerowych COMSOL i MATLAB na konkretnym przykładzie pokazali, że jest możliwa ich współpraca dla zrealizowania opisanego zadania. Głównym problemem jaki wynikł w trakcie realizacji projektu była wymiana danych między programami. Moduł łączący programy korzysta z oprogramowania *Java*. Jest on dość niestabilny i wielokrotnie generował błędy które przerywały obliczenia.

Pomimo występujących trudności całość projektu można ocenić pozytywnie. Wykorzystano możliwości jakie daje połączenie programów, wskazując że może to być użyteczne narzędzie projektowo-badawcze.

LITERATURA

- [1] Jaroszewski K., Algorytmy genetyczne, logika rozmyta i sztuczne sieci neuronowe w środowisku Matlab. Szczecin: Przedsiębiorstwo Produkcyjno-Handlowe ZAPOL Dmochowski, Sobczyk Sp. J., 2013.
- [2] Sikora J., Numeryczne metody rozwiązywania zagadnień brzegowych. Podstawy metody elementów skończonych i metody elementów brzegowych. Politechnika Lubelska, 2011.

- [3] Sradomski W., MATLAB: praktyczny podręcznik modelowania. Gliwice: Helion, 2015.
- [4] Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z., The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2013.
- [5] COMSOL Multiphysics®, COMSOL, Inc. www.comsol.com.
- [6] MATLAB®, The MathWorks, Inc. www.mathworks.com.

**COOPERATION OF COMSOL MULTIPHYSICS® AND MATLAB
COMPUTER PROGRAMS IN THE OPTIMIZATION PROCESS
ON SELECTED EXAMPLES**

In the article, the authors describe the process of modeling the inductive sensor and optimization of selected parameters with data exchange between COMSOL Multiphysics and Matlab calculation packages. In the presented cases, the COMSOL program was used to model the electromagnetic field with the Finite Element Method (FEM), while the Matlab program was used to optimize the sensor using the Genetic Algorithm (AG). The system used in the work consist of three coaxial coils placed at a distance from each other. In the space between the coils an object can be placed. This is an example of the eddy current transducer, which is to be used to determine the type of material from which the tested object is made. In this model, the geometrical dimensions of the coils are subject to optimization. The objective function has been defined in such a way that the differential voltage on the receiver coils should be as close to zero as possible when there is no object.

(Received: 05.02.2018, revised: 10.03.2018)