

## WYKORZYSTANIE METOD OPTIMALIZACJI DO ESTYMACJI ZASTĘPCZYCH WŁASNOŚCI MATERIAŁOWYCH UZWOJENIA MASZYNY ELEKTRYCZNEJ

TOMASZ CZAPLA  
MARIUSZ PAWLAK  
ARKADIUSZ MĘŻYK

*Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Śląska*

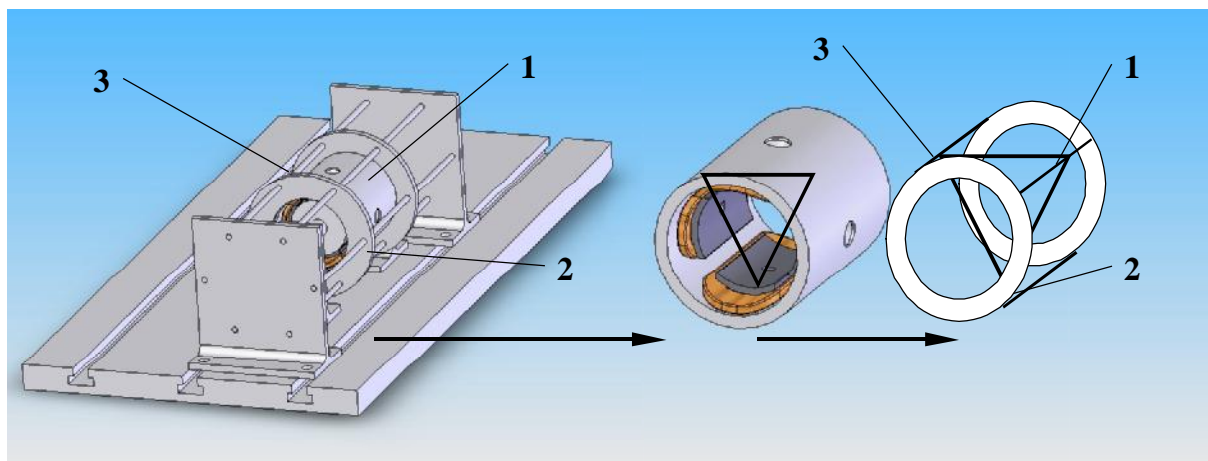
Streszczenie. W niniejszej pracy przedstawiono procedurę poprawiania modelu numerycznego maszyny elektrycznej na podstawie wyników badań eksperymentalnych. Wykorzystano metodę optymalizacji opartą na algorytmach genetycznych do estymacji zastępczych parametrów materiałowych uzwojenia maszyny złożonego z miedzianych prętów oraz izolacji.

### 1. WSTĘP

Zjawiska dynamiczne wywołane czynnikami magnetycznymi oraz mechanicznymi powodują znaczne obciążenia struktury maszyn elektrycznych. Wpływ wymuszenia na maszynę zależy od wielkości sił wymuszających oraz jej wrażliwości na wymuszenie dynamiczne, poziom drgań można zmniejszyć na dwa sposoby: pierwszym z nich jest zmiana charakteru sił wymuszających, drugim – modyfikacja charakterystyk dynamicznych struktury. Eksperyment modalny jest efektywnym narzędziem do wyznaczania rzeczywistych charakterystyk dynamicznych obiektów technicznych, natomiast modelowanie numeryczne pozwala na symulację zmian dynamiki struktury. Nieznajomość rzeczywistych parametrów materiałowych może jednak prowadzić do rozbieżności pomiędzy modelem numerycznym a obiektem rzeczywistym. Dlatego też zachodzi konieczność poprawy modeli z wykorzystaniem wyników badań eksperymentalnych. W niniejszej pracy proponuje się dokonanie tego przy wykorzystaniu algorytmów genetycznych.

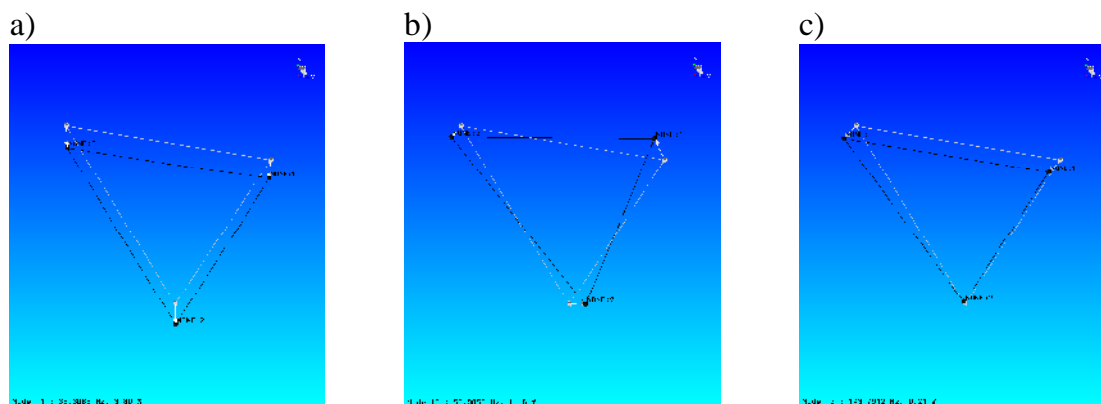
### 2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

W celu wyznaczenia rzeczywistych charakterystyk dynamicznych obiektu, przeprowadzono testy modalne ukierunkowane na wyznaczenie częstotliwości i postaci drgań własnych dla stojana traktowanego jako ciało sztywne. Postacie drgań związane były ze sprężystymi elementami zawieszenia, których parametry zostały dobrane tak, aby częstotliwości ich drgań własnych leżały bezpiecznie daleko od częstotliwości drgań własnych stojana. Przeprowadzono testy impulsowe oraz operacyjną analizę modalną z wymuszeniem eksploatacyjnym. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na stojanie maszyny

Wyniki badań eksperymentalnych, na które składają się postacie oraz odpowiadające im częstotliwości drgań własnych, przedstawiono na rys. 2.



Rys 2. Postacie drgań własnych wyznaczone numerycznie: a) przy 38 Hz, b) przy 56 Hz, c) przy 144 Hz

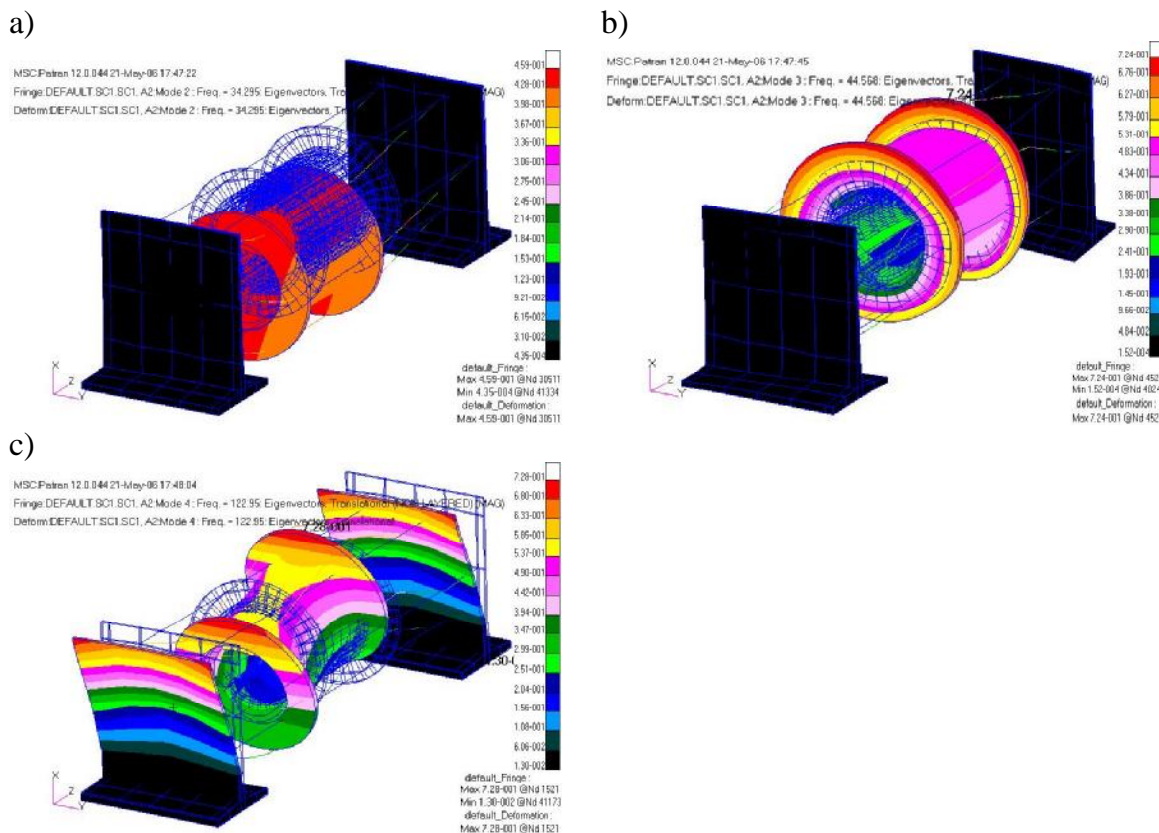
Pierwsza postać drgań własnych odpowiada przemieszczeniom stojana w płaszczyźnie pionowej, druga postać to obrót wokół własnej osi. Trzecia postać związana jest z odkształceniami podstaw zawieszenia.

Wyznaczone w trakcie badań eksperymentalnych postacie oraz częstotliwości drgań własnych stosowane są następnie do poprawy modelu numerycznego.

### 3. MODEL NUMERYCZNY

W pierwszym etapie symulacji numerycznych zbudowano model maszyny na podstawie danych dotyczących geometrii, a parametry materiałowe dla uzwojenia wstępnie przyjęte jak dla miedzi. (rys. 2 i 3).

W budowie modelu wykorzystano elementy belkowe (zawieszenie) oraz bryłowe (podstawy zawieszenia, stojan, uzwojenie oraz kołnierze służące do połączenia stojana z belkami zawieszenia). Podstawy zawieszenia utwierdzono za pomocą elementów sprężystych o wysokiej sztywności.



Rys 3. Postaci drgań własnych wyznaczone numerycznie: a) przy 34Hz, b) przy 52 Hz, c) przy 122 Hz

Ze względu na różnice pomiędzy częstotliwościami drgań własnych a modelem numerycznym oraz wynikami badań eksperymentalnych, stwierdzono konieczność poprawy parametrów modelu MES. Narzędziem w tym przypadku jest metoda optymalizacji oparta na algorytmach genetycznych.

#### 4. ESTYMACJA PARAMETRÓW MODELU NUMERYCZNEGO

W wykorzystywanej metodzie estymacji bardzo istotnym zagadnieniem jest dobór zmiennych decyzyjnych oraz dopuszczalnego zakresu ich wartości. W metodach optymalizacyjnych dąży się przede wszystkim do osiągnięcia pożądanej wartości funkcji celu, najczęściej minimum tejże funkcji. Odpowiedni dobór zmiennych decyzyjnych pozwala na osiągnięcie założonego celu, a ograniczenia dotyczą najczęściej możliwości technicznej realizacji poszukiwanego rozwiązania optymalnego, np. zakres wytrzymałości na rozciąganie dla różnych typów stali, zakres dopuszczalnych grubości ścianek odlewu itp.

Estymacja parametrów modelu dokonana została przez wykorzystanie metod optymalizacji opartych na algorytmach genetycznych głównie ze względu na niejawną postać funkcji celu, definiowaną jako minimum kwadratu sumy różnic pomiędzy poszczególnymi częstotliwościami drgań własnych dla danych eksperymentalnych i numerycznych (rów. 1).

$$j = \sum_{i=1}^n \left( \frac{v_i^* - v_i}{v_i^*} \right)^2 \quad (1)$$

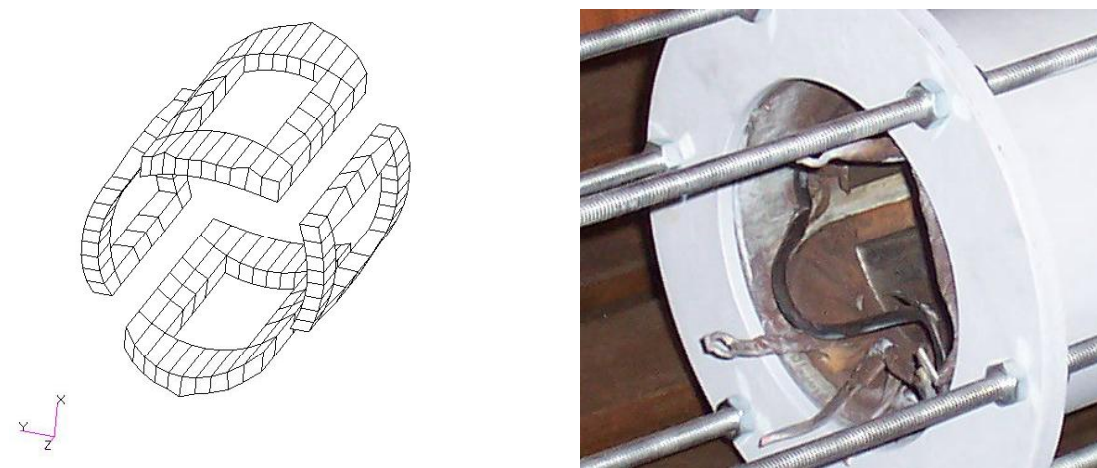
gdzie:

$v_i^*$  – i-ta częstotliwość drgań własnych wyznaczona eksperymentalnie,

$v_i$  – i-ta częstotliwość drgań własnych wyznaczona numerycznie,

$n$  – liczba postaci drgań własnych wzięta pod uwagę w zadaniu.

Estymowanym parametrem jest gęstość uzwojenia (rys. 4). Uzwojenie składa się z miedzianych prętów, odizolowanych od siebie żywicą syntetyczną owiniętych płótnem, również nasączonym żywicą. Proporcje miedzi, żywicy i płótna przyjmuje się za niewiadomą i dla celów modelowania MES przyjmuje się zastępczą gęstość dla całego uzwojenia.



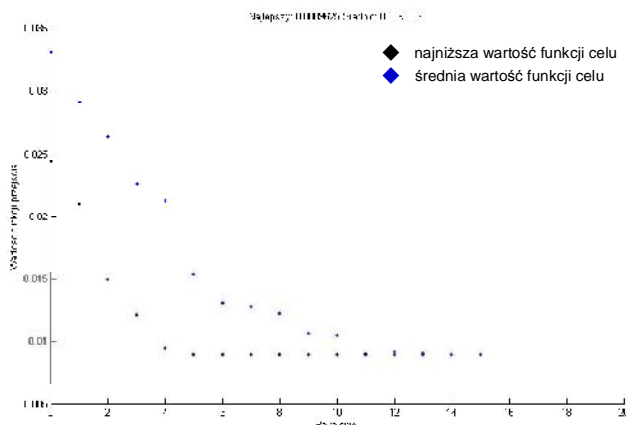
Rys. 4. Geometria uzwojenia w modelu numerycznym oraz jego widok w obiekcie rzeczywistym

Niepełna wiedza na temat składu zespołu: rdzeń uzwojenia, pręty uzwojenia oraz izolacja skłania do poszukiwania gęstości jako parametru mającego wpływ na masę.

Ze względu na stochastyczny charakter procesu optymalizacji opartego na wykorzystaniu algorytmów genetycznych przeprowadzono szereg cykli optymalizacyjnych dla tych samych parametrów (Rys. 5). Różnice pomiędzy poszczególnymi przebiegami dotyczyły zakresu populacji początkowej. Dążono do uzyskania podobnego wyniku identyfikacji dla różnych danych. Podstawowe parametry algorytmu genetycznego to:

- liczba osobników: 15,
- maksymalna liczba populacji: 20,
- prawdopodobieństwo krzyżowania: 0,07,
- prawdopodobieństwo mutacji: 0.03.

Ze względu na małą liczbę zmiennych decyzyjnych przebiegi charakteryzowały się bardzo dużą zbieżnością.



Rys. 5. Przykładowy przebieg funkcji przystosowania

Jednym z warunków, w procesie identyfikacji, była zgodność postaci drgań własnych, co oceniano poprzez sprawdzenie wartości współczynnika MAC (Modal Assurance Criterion). Jego wartość, której sposób wyznaczenia zilustrowano wzorem 2, miała wynosić ponad 96%. W przypadku niespełnienia wymienionego kryterium lub też wygenerowania błędnego modelu osobnik był eliminowany jako najslabiej dostosowany. Na rys. 3 przedstawiono przykładowy przebieg funkcji przystosowania.

$$MAC(\{\psi\}_r, \{\psi\}_s) = \frac{|\{\psi\}_r^{*T} \{\psi\}_s|^2}{(\{\psi\}_r^{*T} \{\psi\}_r) \cdot (\{\psi\}_s^{*T} \{\psi\}_s)} \quad (2)$$

gdzie:

$\{\psi\}_r$  i  $\{\psi\}_s$  – wektory modalne.

Algorytm wykazuje się wysoką skutecznością niezależnie od wyboru populacji początkowej i znajduje minimum funkcji celu przy podobnych wartościach zmiennych decyzyjnych.

Tabela 1. Parametry identyfikowane na drodze optymalizacji

Parametr	Wartość początkowa	Korekta [%]	Wartość ostateczna
Zastępcza gęstość uzwojenia	8920 [kg/m <sup>3</sup> ]	-65,14	3101 [kg/m <sup>3</sup> ]

Gęstość uzwojenia w modelu numerycznym została obniżona do wartości wyznaczonej przez procedury wykorzystujące algorytm genetyczny.

Tabela 2. porównanie wartości częstotliwości drgań własnych dla modeli MES przed i po dostrojeniu oraz dla badań eksperymentalnych

Nr postaci	Częstotliwość drgań własnych		
	Model numeryczny		Badania eksperymentalne
	Przed dostrojeniem	Po dostrojeniu	
1	34,29 Hz	39,16 Hz	<b>38 Hz</b>
2	44,51 Hz	48,437 Hz	<b>56 Hz</b>
3	122,9 Hz	134,6 Hz	<b>144 Hz</b>

Wyniki obliczeń numerycznych dla modelu dostrojonego z wykorzystaniem badań eksperymentalnych przedstawiono w tabeli 2. Widoczna jest poprawa zgodności z rezultatami testów modalnych.

Zgodność postaci drgań własnych była warunkiem wejściowym, zatem współczynnik MAC dla obu modeli numerycznych we wszystkich z rozpatrywanych postaci był bliski 100%, co czyni udoskonalony model tak samo zgodnym z wynikami badań eksperymentalnych jak model wyjściowy.

## 5. PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy zaprezentowano sposób doskonalenia modeli numerycznych na podstawie wyników badań eksperymentalnych. Do poprawy parametrów modeli wykorzystywane są zastępcze wartości stałych materiałowych elementów maszyn o nieznannej strukturze. Do estymacji parametrów modelu wykorzystywane są metody optymalizacji oparte na algorytmach ewolucyjnych, gdzie funkcja celu definiowana jest jako różnica między wartościami częstotliwości drgań własnych wyznaczonymi numerycznie i eksperymentalnie.

Przedstawiona metoda poprawy modeli numerycznych przeznaczona jest do praktycznego zastosowania w przypadkach maszyn, których elementy cechują się złożoną strukturą. Pozwala na budowę modeli MES o parametrach zgodnych z obiektem rzeczywistym a prostej budowie i relatywnie małej liczbie stopni swobody.

## LITERATURA

1. Bachorz P., Marcinkowska M.: Relation between efficiency of a genetic algorithm and assumed optimization parameters. Proceedings of the Scientific Congerence Applied Mechanics, Ostrava 2002, s. 11 – 16.
2. Døssing, O.: Structural Testing Part 1 & 2, Materiały firmy Brüel&Kjær . BR 0458-11 & BR 0507-11.
3. Ewins J.: Modal testing: theory and practice. Reading. MA, Research Studies Press Ltd 1984.
4. Goldberg D.E.: Algorytmy genetyczne i ich zastosowanie. WNT, Warszawa 1995.
5. Uhl T.: Komputerowo wspomagana identyfikacja modeli konstrukcji mechanicznych. WNT, Warszawa 1997.

## **APPLICATION OF OPTIMIZATION METHODS FOR EQUIVALENT MATERIAL PARAMETERS ESTIMATION OF ELECTRIC MACHINE COILS**

Summary. This paper presents an application of optimization methods based on genetic algorithms for equivalent material properties estimaton of electric machine elements. Optimisaton method was used to estimate equivalent materials parameters of coils made of copper and insulation.