

RUTCZYŃSKA-WDOWIAK Katarzyna¹
 MAKOWSKI Michał²

Analiza wpływu wybranych parametrów algorytmu genetycznego w problemie identyfikacji modelu tłumika MR

Algorytm genetyczny, rozmiar populacji przestrzeń poszukiwań, identyfikacja, matematyczny model, tłumik magneto-reologiczny

Streszczenie

Praca jest poświęcona identyfikacji parametrów modelu sterowanego tłumika magneto-reologicznego (MR) oraz eksperymentalnej weryfikacji modelu tłumika. Model urządzenia został opracowany w postaci struktury reologicznej. Do badań numerycznych opracowany został matematyczny model opisujący zjawiska zachodzące w tłumiku. W pracy zostały przedstawione wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych własności sterowanego tłumika MR. Parametry modelu tłumika MR wyznaczone w identyfikacji przy użyciu wybranego algorytmu genetycznego wykazują największą zbieżność wyników badań symulacyjnych z badaniami eksperymentalnymi. Analizowano wpływ rozmiaru populacji oraz zadanych przestrzeni poszukiwań rozwiązania algorytmu genetycznego na wyniki procesu identyfikacji.

THE ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF CHOSEN PARAMETERS OF GENETIC ALGORITHM IN IDENTIFICATION PROBLEM OF THE MR DAMPER MODEL

Abstract

In this paper, a mathematical model of a magneto-rheological damper is presented. Moreover, identification of model parameters is described and compared with results of direct experiment. Device model was developed as a rheological structure. Set of mathematical equations was used to describe the phenomena occurring in the MR damper. In this paper are also presented results of numerical and experimental studies. Parameters of the damper model MR appointed in the identification with the use of the chosen genetic algorithm show the greatest convergence of simulation results with experimental research. The influence of the population size and the search space of solution of the genetic algorithm on results of the identification was analysed.

1. WSTĘP

Praca związana jest z tematyką obejmującą metody aktywnego tłumienia drgań w pojazdach, maszynach oraz konstrukcjach budowlanych. Drgania w obiektach technicznych mogą być wywołane wymuszeniami wewnętrznymi przez elementy układu lub pochodzącymi z zewnątrz np. w przypadku pojazdów od nierówności drogi. Rozwój półaktywnych i aktywnych metod tłumienia drgań był możliwy przez zastosowanie w tłumikach drgań materiałów inteligentnych, do których można zaliczyć: tłumiki magneto-reologiczne, elektro-reologiczne i tłumiki z zaworem sterowanym piezoelektrykiem. Wykorzystanie własności cieczy magneto-reologicznej lub elektro-reologicznej umożliwia rozpraszanie energii poprzez zmianę lepkości tej cieczy pod wpływem pola magnetycznego lub elektrycznego [1, 3]. W przypadku stosowania tłumików z piezoelektrykiem energia jest rozpraszana w wyniku zmian wielkości szczeliny w zaworze sterowanym stosem piezoelektrycznym [5].

W pracy zostały zaprezentowane przykładowe wyniki badań eksperymentalnych sterowanego magneto-reologicznego tłumika drgań. Do przeprowadzenia badań wykorzystano oryginalne rozwiązanie sterowanego tłumika magneto-reologicznego, w którym siła tłumienia zależy od zmian natężania prądu. W tłumiku zastosowano ciecz magneto-reologiczną firmy LORD [7]. W trakcie badań zmianom podlegało natężenie prądu celem uzyskania możliwie dużego obszaru zmian sił tłumienia na podstawie, których opracowane zostały charakterystyki tłumika magneto-reologicznego (MR).

Matematyczny model tłumika MR został opisany w postaci struktury reologicznej, a własności cieczy są prezentowane przez parametry, które zostały wyznaczone na podstawie kilku metod przedstawionych w pracy. Parametry modelu opisują własności lepko-sprężyste cieczy magneto-reologicznej. Do przeprowadzenia badań symulacyjnych opracowany został program na podstawie modelu tłumika MR. Wyznaczane parametry modelu tłumika powinny być tak dobrane, aby wyniki badań symulacyjnych i badań eksperymentalnych były do siebie zbliżone. Wyniki badań eksperymentalnych jak i symulacyjnych zostały przedstawione w postaci wykresów przebiegu ugięcia tłumika i sił funkcji czasu oraz w postaci charakterystyk w płaszczyznach siła-przemieszczenie i siła-prędkość.

Wyznaczone parametry modelu tłumika MR były oceniane na podstawie przyjętego do badań wskaźnika jakości, który był sumą różnicy kwadratów sił tłumienia uzyskanych z badań eksperymentalnych i sił tłumienia uzyskanych z badań symulacyjnych w stosunku do sumy kwadratu sił uzyskanych z badań eksperymentalnych, do oceny wskaźnika

¹ Politechnika Świętokrzyska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki; 25-314 Kielce; Al. 1000-lecia P.P. 7. Tel: +48 41 34 24 214, E-mail: K.Ruczynska@tu.kielce.pl

² Politechnika Warszawska, Instytut Pojazdów; 02-524 Warszawa; ul. Narbutta 84; Tel: + 48 22-234-85-91, E-mail: michal.makowski@simr.pw.edu.pl

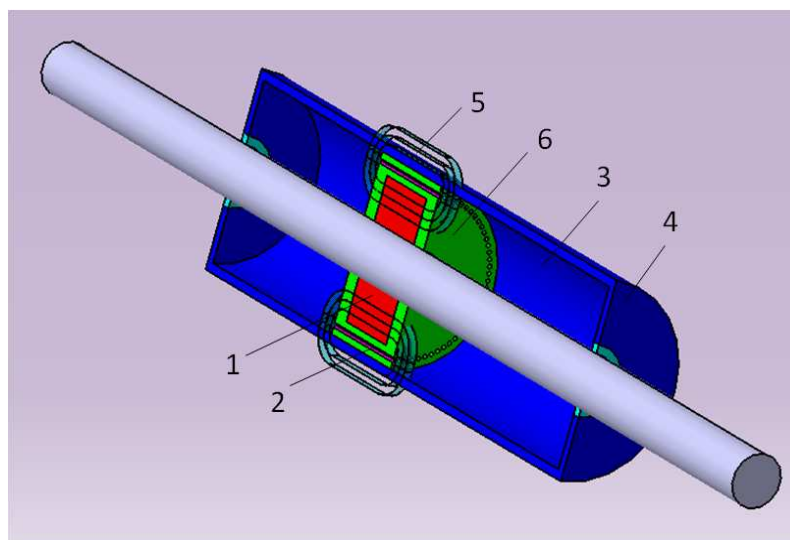
przyjęto stałą ilość próbek. Parametry modelu tłumika zostały wstępnie oszacowane na podstawie charakterystyk tłumika uzyskanych z badań eksperymentalnych a następnie posłużono się metodami numerycznymi.

Wartości parametrów modelu zostały wstępnie przyjęte ze względu na zakres przeszukiwań w przypadku stosowania metod optymalizacyjnych. Początkowo do badań zastosowano metodę przeszukiwań w całym zbiorze rozwiązań z uwzględnieniem kolejnych parametrów, a następnie zastosowano algorytmy genetyczne (AG).

Wybór AG do wyznaczenia parametrów modelu tłumika magneto-reologicznego wynika z faktu, że algorytm ten przez losowy wybór dostatecznie wielu reprezentantów populacji zapewnia większą szansę wyznaczenia minimum globalnego przyjętego wskaźnika jakości identyfikacji, niż metody klasyczne. W przypadku omawianych algorytmów bardzo istotny jest odpowiedni dobór parametrów AG, do których można zaliczyć: rozmiar populacji oraz przestrzeń poszukiwań rozwiązania. Niewłaściwy wybór ww. parametrów AG może być przyczyną przedwczesnej zbieżności algorytmu genetycznego lub niekorzystnie wpływać na czas analizowanego procesu identyfikacji [12]. W pracy wykorzystano algorytm genetyczny zaimplementowany w środowisku Matlab oparty na krzyżowaniu (zastosowano ang. scattered crossover [10]), selekcji (ang. stochastic uniform selection [4], z uwzględnieniem skalowania funkcji przystosowania (przyjęto ang. rank scaling) i migracji [6]. Badania koncentrowały się na określeniu wpływu rozmiaru populacji oraz przestrzeni poszukiwań na dokładność i czas, w jakim uzyskano rozwiązanie.

2. BADANIA TŁUMIKA MAGNETO-REOLOGICZNEGO

Do przeprowadzenia badań wykorzystano sterowany tłumik magneto-reologiczny. Jest tłumik hydrauliczny wypełniony cieczą magneto-reologiczną (MR), która jest zawiesiną złożoną z oleju mineralnego lub syntetycznego oraz z rozproszonych cząstek ferromagnetycznych o rozmiarach 1-10 μm [7].



Rys. 1. Schemat tłumika magneto-reologicznego: 1 - cewka, 2 - szczelina, 3 – ciecz magneto-reologiczna, 4 – cylinder, 5 – linie pola magnetycznego, 6- tłok

Na rysunku 1 przedstawiono konstrukcję tłumika magneto-reologicznego. Zmiany sił tłumienia następują w wyniku zmian sił pola magnetycznego 5 wytwarzanego przez cewkę 1, wówczas ciecz magneto-reologiczna 3 przepływając przez szczelinę 2 znajduje się w polu magnetycznym, gdzie zmienia swoją lepkość powodując zwiększenie sił tłumienia podczas ruchu tłoka 6 względem obudowy 4. Przepływowi cieczy przez szczelinę towarzyszy rozpraszanie energii. Do opisu cech sprężysto-lepkich cieczy magneto-reologicznej można posłużyć się ciałem Bingham.

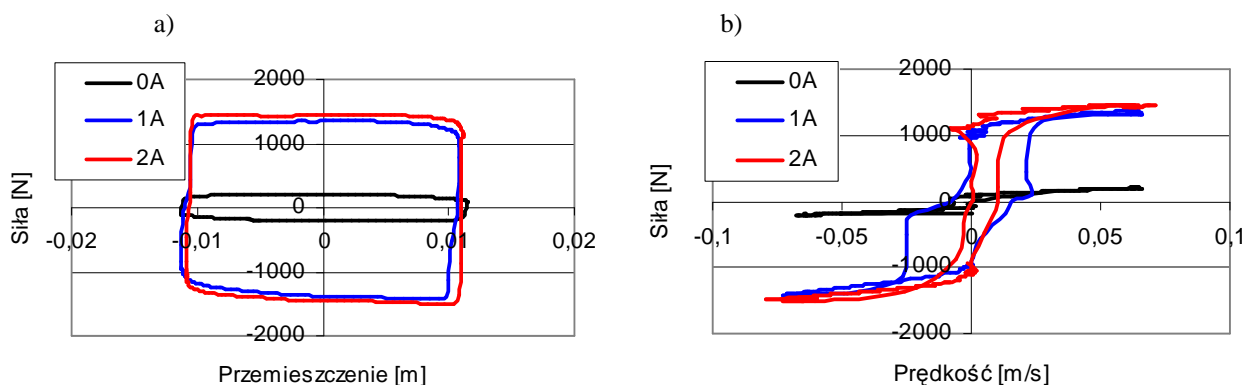
Konstrukcja tłumika MR została opracowana i wykonana w Instytucie Pojazdów Politechniki Warszawskiej. W trakcie realizacji projektu uwzględniono możliwość zmian wielkości szczeliny w tłumiku poprzez wymienne elementy. Układ elektroniczny cewki wytwarzający pole magnetyczne został zaprojektowany tak, aby można było go zasilać prądem o natężeniu max. 2 A. W celu uzyskania jak największego zakresu sił tłumienia elementy przenoszące pole magnetyczne zostały wykonane z materiału żelazo Armko, ponieważ materiał ten charakteryzuje się małą pozostałością magnetyczną.

Dyssypacyjne charakterystyki tłumika MR zostały wyznaczone na stanowisku pomiarowym służącym do badań własności sterowanych tłumików. Na rysunku 2 przedstawione zostało stanowisko do badań własności tłumików. Charakterystyki tłumików zostały wyznaczone na podstawie sił w funkcji przemieszczeń i prędkości odkształceń tłumika. Pomiar tych wielkości były realizowane przy pomocy czujnika siły oraz czujnika przemieszczeń. Ruch tłumika MR był realizowany przez wymuszenie kinematyczne, które zapewniał zainstalowany siłownik hydrauliczny. Układ hydrauliczny zapewniał realizację założonego przebiegu sinusoidalnego przy założonej amplitudzie i częstotliwości wymuszeń. Celem realizacji odpowiedniego sygnału sterujący opracowany został program sterujący elektrozaworem w układzie hydraulicznym, program ten umożliwiał również archiwizację danych w przebiegu sił i przemieszczeń.



Rys. 2. Stanowisko do badań własności tłumików MR

W pracy zostały zaprezentowane przykładowe wyniki badań eksperymentalnych, dla których przeprowadzono identyfikacje parametrów, które zostały zaprezentowane w dalszej części. Na rysunku 3 zostały przedstawione wyniki badań w płaszczyźnie siła-przeszyczenie oraz siła-prędkość. Badania prowadzono przy wymuszeniu układu funkcją harmoniczną z częstotnością 0,8 Hz i amplitudzie 0,012 m. Przedstawiono dwa przebiegi bez zasilania cewki i przy zasilaniu prądami 1 A i 2 A.



Rys. 3. Wyniki badań eksperymentalnych tłumika MRD bez zasilania oraz zasilaniem 1A i 2A przy wymuszeniu z częstotnością 0,8 Hz i amplitudzie 0,012m, a) siła-przeszyczenie, b) siła-prędkość

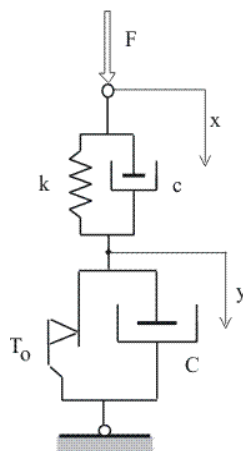
Na podstawie prezentowanych wyników badań można wykazać wpływ zasilania prądem cewki tłumika MR na wzrost sił tarcia w tłumiku, co zapewnia zmianę własności dyssypacyjnych urządzenia. Rozwiązanie takie umożliwia na płynne sterowania siłą tłumienia w układzie mechanicznym poprzez zmianę prądu w układzie elektrycznym.

3. MATEMATYCZNY MODEL TŁUMIKA MR

Na podstawie wyników badań eksperymentalnych przystąpiono do opracowania modelu tłumika. W pracy przyjęto matematyczny model tłumika magneto-reologicznego w postaci struktury zaproponowanej przez W. Grzesikiewicza [3]. Na rysunku 4 przedstawiono strukturę reologiczną będącą modelem badanego tłumika. Współczynniki empiryczne służą do opisu cech lepko-sprężystych struktury. Parametry wstępnie zostały oszacowane na podstawie charakterystyk dyssypacyjnych tłumika MR uzyskanych z badań eksperymentalnych, które posłużyły do przeprowadzenia badań numerycznych. Wstępnie założono, że wraz ze zmianami prądu w modelu tłumika będzie zmieniał się tylko jeden parametr struktury. Największe zmiany wartości były przy parametrze T_0 , które prezentuje tarcie suche w układzie. Pozostałe parametry modelu zmieniały się ze zmianami prądu w mniejszym zakresie niż w przypadku tarcia suchego, dlatego pozostają one bez zmian.

Matematyczny model tłumika MR posłużył do opracowania programu symulacyjnego do badań własności tłumika. Zmieniając parametry tłumika w modelu numerycznym możliwe było przeprowadzenie badań w różnych warunkach pracy (wymuszeń kinematycznych) oraz zmian wartości T_0 , który charakteryzował zmiany prądu w trakcie badań eksperymentalnych.

Dobór parametrów tłumika MR był bardzo istotny ze względu na zbieżność wyników z badań eksperymentalnych oraz badań symulacyjnych. Wielkości parametrów modelu tłumika MR dobierano tak, aby dyssypacyjne charakterystyki wyznaczone w trakcie badań numerycznych były zbliżone do odpowiadających badań eksperymentalnych. Do badań porównawczych wykorzystano wstępnie algorytmy bazujące na minimalizowaniu odchylenia standardowego przebiegu sił w czasie. W rezultacie tak przeprowadzonej identyfikacji uzyskano wartości parametrów modelu przedstawione w tabeli 1.



Rys. 4. Schemat struktury reologicznej tłumika MR

Matematyczny opis przemieszczenia i sił działających na strukturę przedstawioną na rysunku 4 ma postać:

$$(C + c) \cdot \dot{y} + \tau \cdot T_0 = c \cdot \dot{x} + k \cdot (x - y) \tag{1}$$

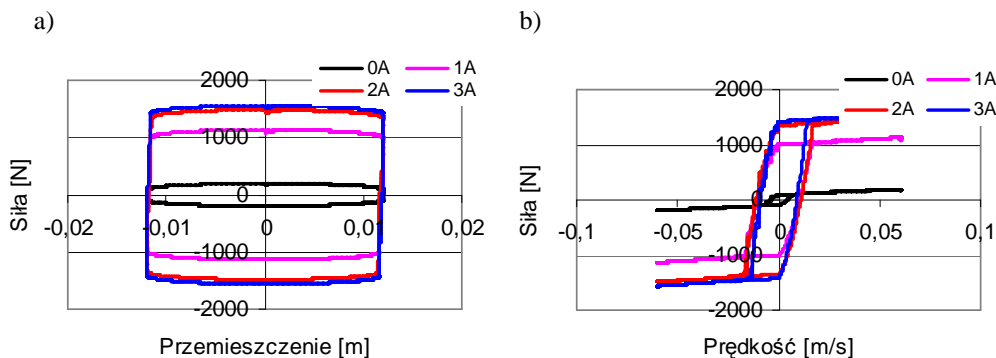
$$F = c \cdot (\dot{x} - \dot{y}) + k \cdot (x - y) \tag{2}$$

$$\tau \in \begin{cases} \{\text{sign } \dot{y}\} & , \text{gdy } \dot{y} \neq 0 \\ [-1, +1] & , \text{gdy } \dot{y} = 0 \end{cases} \tag{3}$$

gdzie: C, T₀, c, k - liczby dodatnie charakteryzujące lepko-sprężyste cechy struktury
 x, y - współrzędne modelu
 F - siła działająca na strukturę

Tab. 1. Parametry modelu tłumika MR

Natężenie prądu I [A]	T ₀ [N]	k [N/m]	C [Ns/m]	c [Ns/m]
0	90	2860·10 ³	2,24·10 ³	44,6·10 ³
3A	1450	2860·10 ³	2,24·10 ³	44,6·10 ³



Rys. 5. Wyniki badań symulacyjnych modelu tłumika MR uzyskanych przy zasilaniu cewki 0 - 3A: siła-przeszczenie (a), siła-prędkość (b)

Na podstawie wyznaczonych parametrów tłumika MR (tabela 1) przeprowadzono badania numeryczne, które odpowiadały badaniom eksperymentalnym. Na rysunku 5 przedstawiono wyniki badań numerycznych, które odpowiadały badaniom eksperymentalnym prezentowanym na rysunku 3.

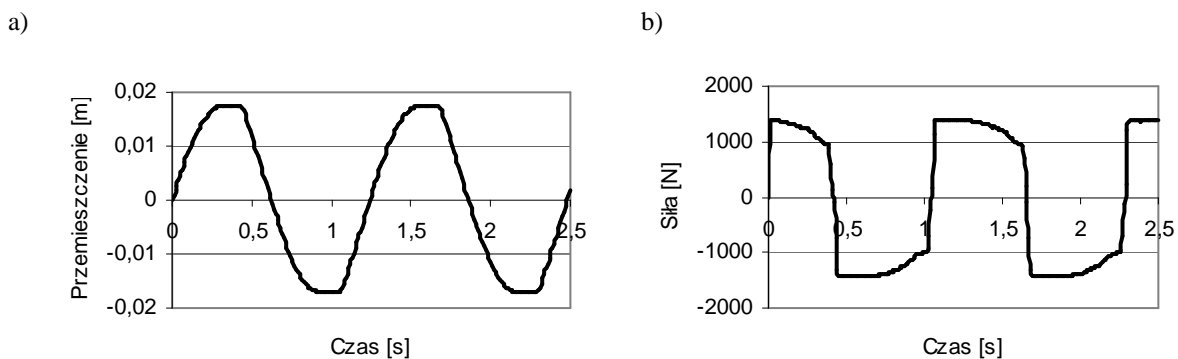
4. IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW MODELU TŁUMIKA MR

Parametry modelu tłumika MR zostały wstępnie oszacowane na podstawie charakterystyk tłumika uzyskanych podczas badań eksperymentalnych. Metoda ta służyła do wstępnego oszacowania wartości parametrów i sprawdzenia poprawności przyjętego modelu numerycznego tłumika. Do dalszych badań wprowadzono zależność (4), jako kryterium oceny zbieżności przebiegów sił w czasie na podstawie badań eksperymentalnych i sił wyznaczonych w badaniach numerycznych przy wyznaczonych parametrach w oparciu o metody optymalizacyjne. Kryterium oceny była minimalizacja wskaźnika W przedstawionego w postaci:

$$W = \frac{\sum (x_p - x_s)^2}{\sum x_p^2} \quad (4)$$

gdzie: W - funkcja opisująca różnicę sił
 x_p - wynik badań eksperymentalnych
 x_s - wynik badań symulacyjnych

Ocena doboru parametrów modelu tłumika odbywała się poprzez porównanie przebiegów sił tłumienia w czasie na podstawie badań eksperymentalnych z wynikami badań na podstawie optymalizacji. Na rysunku 6. b) przedstawiono przebieg sił z eksperymentu przy zasilaniu tłumika MR prądem 2 A. Przebieg ten posłużył do celów porównawczych z wynikami badań metodami optymalizacyjnymi. Dodatkowo na rysunku 6. a) pokazano przebieg przemieszczenia w czasie o amplitudzie 0,018 m i częstotliwości 0,8 Hz. Przemieszczenia te zostały zarejestrowane podczas badań na stanowisku, a następnie wykorzystano je do wymuszeń w modelu numerycznym tak, aby uzyskać jednakowe warunki wymuszeń kinematycznych.



Rys. 6. Wyniki badań eksperymentalnych tłumika MR z zasilaniem 2A przy wymuszeniu z częstotliwością 0,8 Hz i amplitudzie 18 mm, a) przemieszczenie w czasie, b) siła w czasie

Identyfikację parametrów modelu tłumika magneto-reologicznego prowadzono kilkoma metodami. Na początku badań skorzystano z metody gradientowej, gdzie przeszukiwano zbiór rozwiązań przy zmianie tylko jednego parametru. Efektem prowadzonych prac była poprawa uzyskanych parametrów modelu tłumika, co jest prezentowane przez wskaźnik jakości W, uzyskano wartość wskaźnika $W_0 = 0,1197$ na podstawie oszacowanych parametrów a na podstawie metody gradientowej uzyskanego wartość wskaźnika $W_G = 0,06049$. Wartości parametrów uzyskanych z metody gradientowej przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Parametry modelu tłumika MR z użyciem metody gradientowej

Natężenie prądu I [A]	T_0 [N]	k [N/m]	C [Ns/m]	c [Ns/m]
2A	1222	$2,42 \cdot 10^5$	$2,25 \cdot 10^3$	$77,25 \cdot 10^3$

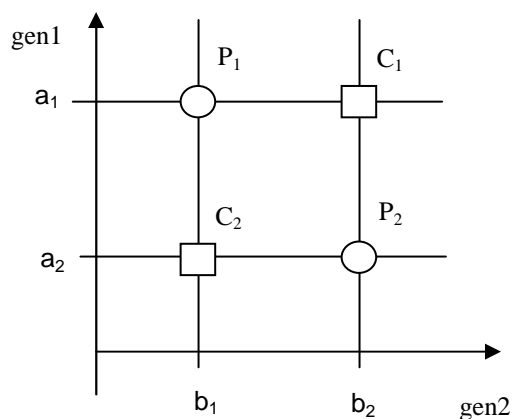
Do dalszych badań wykorzystano algorytm genetyczny bazujący na podstawowych operacjach genetycznych. Proces selekcji zrealizowano w oparciu o ang. stochastic uniform selection [4]. Ogólny schemat tej metody selekcji został przedstawiony w pracy [6] i polega na losowym uporządkowaniu populacji oraz wygenerowaniu liczby p należącej do przedziału $\langle 0, \text{suma Fitness}/N \rangle$, gdzie N jest oczekiwaną liczbą osobników. W kolejnym kroku wybieranych jest N osobników poprzez wygenerowanie N wskaźników oddalonych o $1 \langle p, p+1, \dots, p+N-1 \rangle$ i wybór osobników, których

przedział przystosowania przypada na pozycje wskaźników. Ze względu na stabilność tej selekcji jest ona szeroko stosowana w algorytmach genetycznych [6]. W operacji krzyżowania zastosowano według [10] ang. scattered (conventional) crossover polegające na tym, że rodzice wymieniają odpowiednie geny, aby ukształtować swojego potomka odbywa się to przy zastosowaniu maski bitowej. Krzyżowanie może być jedno- lub wielopunktowe [10]. Utworzenie potomków jest realizowane według następujących zależności [10]:

$$\begin{aligned} C_1 &= \text{Mask}_1 \& P_1 + \text{Mask}_2 \& P_2 \\ C_2 &= \text{Mask}_2 \& P_1 + \text{Mask}_1 \& P_2 \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie: P_1, P_2 – rodzice
 C_1, C_2 – potomkowie
 $\text{Mask}_1, \text{Mask}_2$ – maski bitowe ($\text{Mask}_2 = \text{NOT}(\text{Mask}_1)$)
 $\&$ - operacja AND

Geometryczna reprezentacja tego typu krzyżowania osobnika z dwoma genami została pokazana na rysunku 7. Przyjęto następujące oznaczenia, tj.: $P_1 = [a_1, b_1]$, $P_2 = [a_2, b_2]$ - geny w bieżącej populacji (geny rodziców), gdzie $[a_1, b_1]$ i $[a_2, b_2]$ - przedziały określoności parametrów (przestrzenie poszukiwań rozwiązania) oraz $\text{Mask} = [1 \ 0]$, a także $C_1 = [a_1, b_2]$, $C_2 = [a_2, b_1]$ - geny w populacji następnej (geny potomków) [10].



Rys. 7. Graficzna reprezentacja krzyżowania (ang. scattered crossover) [10]

W algorytmie genetycznym dodatkowo wykorzystano skalowanie funkcji przystosowania (ang. rank scaling) oraz migrację polegającą na odpowiednim przemieszczaniu się osobników między podpopulacjami [6]. Algorytm kończy działanie, gdy osiągnie zadana na początku uruchomienia procedury identyfikacji liczbę iteracji lub zadziała dodatkowe kryterium stopu.

Tab. 3. Analiza wpływu rozmiaru populacji algorytmu genetycznego na wyniki identyfikacji parametrów modelu tłumika MR

Rozmiar populacji	Średnie wartości parametrów				Wartość wskaźnika W	Liczba iteracji AG	Czas procesu [s]
	T ₀	k	C	c			
20	1120,4787	381195,7071	3407,0632	72534,6522	0,0317	61	101
40	1107,7384	378413,1126	3649,5558	74901,1226	0,0308	59	193
60	1097,8189	390834,1511	3781,4813	76615,7303	0,0305	52	252
80	1095,6324	389056,9099	3814,8239	76233,9098	0,0304	51	335
100	1091,6376	392704,2624	3899,6734	76814,1434	0,0302	51	420
120	1091,4512	395102,1176	3867,9228	77087,1311	0,0302	51	501

Proces identyfikacji parametrów matematycznego modelu tłumika magneto-reologicznego polegał na minimalizacji przyjętego wskaźnika jakości opisanego zależnością (4). W procesie identyfikacji z zastosowaniem AG wyznaczono 4 parametry modelu tłumika MR, tj. T₀, k, C oraz c. Wyniki przebiegu sił z procesu identyfikacji przy użyciu AG zostały porównywane z przebiegiem wzorcowym. Model symulacyjny wymuszony był kinetyczne zgodnie z przebiegiem

przedstawionym na rysunku 6.a). W programie optymalizacyjnym wykorzystano procedurę w Optintool w programie Matlab oraz model numeryczny tłumika MR.

Jednym z kluczowych problemów dotyczących rozwiązania omawianego zagadnienia z zastosowaniem algorytmu genetycznego jest odpowiedni dobór wartości parametrów AG. W niniejszej pracy badania koncentrowały się na doborze wybranych parametrów, tj. rozmiaru populacji oraz przestrzeni poszukiwania rozwiązania, które zdaniem autorów, mają znaczący wpływ na uzyskane wyniki identyfikacji.

Ze względu na stochastyczny charakter algorytmów genetycznych każde uruchomienie procedury identyfikacji daje trochę inne wyniki, dlatego zwykle podaje się średni wynik z 10-ciu niezależnych doświadczeń (tabela 3) lub najlepszy rezultat z przeprowadzonej serii 10-ciu badań (tabela 4).

W tabeli 3 przedstawiono analizę wpływu rozmiaru populacji algorytmu genetycznego na wyniki identyfikacji parametrów modelu tłumika MR. Badania przeprowadzono dla identycznych przestrzeni poszukiwań rozwiązania przyjmując populacje o rozmiarze 20-120, w celu uzyskania lepszej perspektywy.

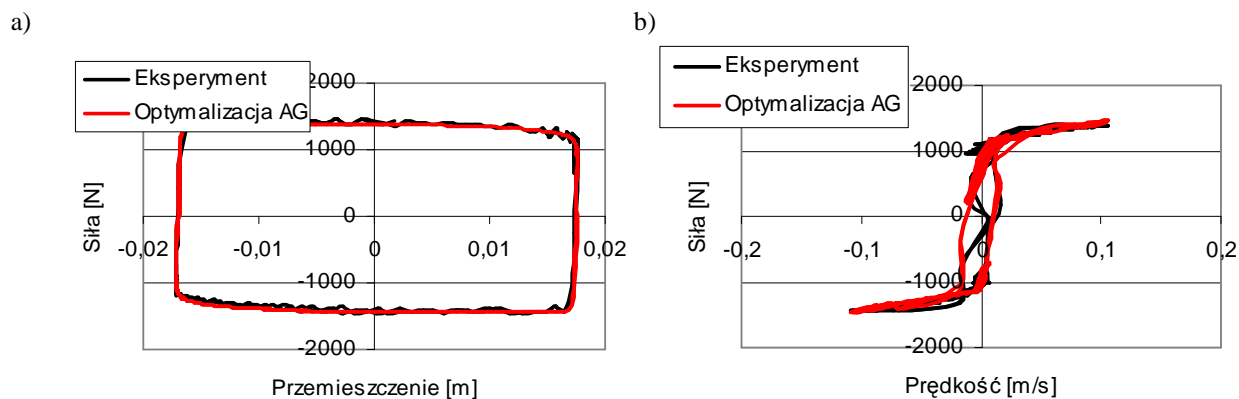
Przedstawione w tabeli 3 wyniki identyfikacji matematycznego modelu tłumika MR z zastosowaniem AG pokazują, że algorytmy genetyczne dla małych populacji działają słabiej (oceniając uzyskaną wartość minimalizowanego wskaźnika W), niż dla populacji o większym rozmiarze. Zwiększenie rozmiaru populacji zapewnia większe możliwości „manipulowania” wartościami parametrów, dlatego statystycznie zapewnia wzrost prawdopodobieństwa zlokalizowania minimum globalnego przyjętego wskaźnika jakości (4). Rozmiar populacji, przy właściwie dobranych pozostałych parametrach AG, wpływa w znacznym stopniu na zbieżność i dokładność analizowanego procesu identyfikacji oraz na czas obliczeń. Wzrost rozmiaru populacji spowodował poprawę uzyskanych wyników, jednocześnie powodując wydłużenie czasu procesu identyfikacji. Najlepsze rezultaty, z uwagi na najmniejszą wartość W otrzymano w przypadku populacji o rozmiarze 100 oraz 120, natomiast najgorsze – dla populacji o rozmiarze 20.

Tabela 4 przedstawia analizę wpływu przyjętych przestrzeni poszukiwań rozwiązania algorytmu genetycznego w problemie identyfikacji parametrycznej modelu tłumika MR. Są to najlepsze rezultaty z serii wykonanych doświadczeń. (serię stanowi 10 doświadczeń zrealizowanych dla każdej z rozważanych przestrzeni poszukiwań). W badaniach wykorzystano populacje o rozmiarze 100 osobników.

Tab. 4. Analiza wpływu przestrzeni poszukiwań rozwiązania algorytmu genetycznego na wyniki identyfikacji parametrów modelu tłumika MR

Przeźrzeń poszukiwań	Wartości wyznaczonych parametrów				Wartość wskaźnika W	Liczba iteracji AG	Czas [s]
	T ₀	k	C	c			
T ₀ =[100, 2500] k=[2000000, 6000000] C=[2000, 8000] c=[10000, 100000]	1127,70489	3845313,638	3031,20758	24359,89952	0,01628	74	637
T ₀ =[800, 1500] k=[3000000, 4500000] C=[2500, 4500] c=[15000, 40000]	1136,34416	4002681,051	2894,21325	23434,64524	0,01624	51	412

Przeprowadzone badania wskazują, że wielkość przestrzeni poszukiwań rozwiązania ma wpływ na wyniki procesu wyznaczania parametrów modelu tłumika MR. Założenie mniejszej przestrzeni poszukiwań powoduje, że algorytm genetyczny osiąga lepsze rezultaty, niż w przypadku zadania znacząco większej przestrzeni, o czym świadczą uzyskane wartości wskaźnika jakości W. W ujęciu statystycznym duża przestrzeń poszukiwań może spowodować wydłużenie czasu analizowanego procesu.



Rys. 8. Porównanie wyników badań eksperymentalnych i wyników uzyskanych z optymalizacji modelu tłumika MR: a) siła-przemieszczenie, b) siła-prędkość

Na rysunku 8 przedstawiono porównanie wyników badań eksperymentalnych z wynikami uzyskanymi z optymalizacji (najlepszy wynik z serii 10-ciu doświadczeń). Przedstawiono przebieg siła-przemieszczenia na rysunku 8.a) a na rysunku 8.b) siła-prędkość. Przedstawione wyniki potwierdzają zbieżność przebiegów na podstawie badań eksperymentalnych i optymalizacji z zastosowaniem algorytmu genetycznego.

5. ZAKOŃCZENIE

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych wykazano, że zmiana natężenia prądu płynącego w uzwojeniu cewki wpływa na zmianę sił tarcia w tłumiku magneto-reologicznym. Zastosowanie tłumików MR w urządzeniach z adaptatywnym systemem tłumienia drgań jest możliwe dzięki sterowaniu ich własnościami dyssypacyjnymi. Siła tłumienia w takich systemach może być sterowana poprzez zmianę wartości prądu w układzie elektrycznym.

Model tłumika został opisany w postaci struktury reologicznej, którego parametry zostały wyznaczone na podstawie wyników badań eksperymentalnych. Do oceny parametrów identyfikacji wprowadzono kryterium oceny, którym była minimalizacja sumy różnicy kwadratów sił tłumienia uzyskanych z badań eksperymentalnych i sił tłumienia uzyskanych z badań symulacyjnych w odniesieniu do sumy kwadratu sił tłumienia z badań eksperymentalnych. Badania symulacyjne zostały przeprowadzone w opracowanym programie symulacyjnym na podstawie modelu tłumika MR. Wyniki badań symulacyjnych posłużyły do wyznaczenia dyssypacyjnych charakterystyk tłumika MR.

Uzyskane wyniki badań umożliwiły wyznaczenie dyssypacyjnych charakterystyk tłumika oraz ocenę wpływu sterowania (zmian pola magnetycznego) na wartość sił tarcia w tłumiku. W badaniach symulacyjnych uwzględniono wpływ natężenia prądu, któremu odpowiada parametr T_0 .

Identyfikacja parametrów została wykonana kilkoma metodami, przy czym przeprowadzone badania wskazują, że metodą najbardziej skuteczną okazał się algorytm genetyczny, o czym świadczy najmniejsza uzyskana wartość wskaźnika jakości W . W pracy przedstawiono analizę wpływu wybranych parametrów algorytmu genetycznego, takich jak: rozmiar populacji i przestrzeń poszukiwań rozwiązania na wyniki wyznaczania wartości parametrów modelu tłumika MR. Badania dotyczyły takiego doboru tych parametrów, aby uzyskać dobrą zbieżność, dokładność i możliwie najkrótszy czas procesu.

Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń można stwierdzić, że skuteczność i efektywność działania algorytmu genetycznego zależy od odpowiedniego doboru wielkości populacji i przestrzeni poszukiwań. Rozmiar populacji oraz przestrzeni poszukiwań rozwiązania powinny być dobrane w taki sposób, aby zapewnić odpowiednią różnorodność populacji oraz napór selekcyjny. Można zauważyć, że w przypadku zbyt małych populacji algorytm genetyczny osiąga gorsze wyniki z uwagi na wartości minimalizowanego wskaźnika jakości identyfikacji, niż w przypadku większych populacji. Wzrost rozmiaru populacji oraz wielkości przestrzeni poszukiwań powoduje wydłużenie czasu procesu identyfikacji parametrycznej. Ustalono rozmiar populacji oraz przestrzeni poszukiwań rozwiązania, dla których algorytm genetyczny statystycznie osiąga najlepsze rezultaty.

Realizacja prac przedstawionych w ramach niniejszego artykułu była możliwa dzięki otrzymaniu finansowania projektu N N 502 1492 39 Redukcja drgań maszyn i konstrukcji budowlanych za pomocą sterowanych dyssypatorów.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Duysinx P, Bruls O, Collard J. F, Fiset P, Lauwerys J. S.: *Optimization of mechatronic systems: application to a modern car equipped with a semi-active suspension*, 6th World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization, Rio de Janeiro, Brazil, 30 May - 03 June 2005.
- [2] Goldberg D. E.: *Algorytmy genetyczne i ich zastosowania*, Warszawa, WNT 1995.
- [3] Grzesikiewicz W., Makowski M., Pyrz M.: *Estymacja parametrów modelu tłumika magneto-reologicznego z wykorzystaniem algorytmów genetycznych*. *Pomiary Automatyka Kontrola*, Vol. 57, nr 9/2011, s. 1044-1047. ISSN 0032-4140.
- [4] Kokkoras F., Paraskevopoulos K.: *GAs Exercise*, http://rad.ihu.edu.gr/fileadmin/labsfiles/decision_support_systems/lessons/genetic_algorithms/GAs.pdf
- [5] Knap L., Makowski M., Grzesikiewicz W.: *Vibration control of vehicle equipped with piezoelectric dampers*, *Journal of KONES POWERTRAIN AND TRANSPORT* Vol. 18 No 4, Warszawa 2011, s. 251-258, ISSN 1231 4005.
- [6] Król Zb.: *Przegląd i komputerowa implementacja algorytmów genetycznych w oprogramowaniu edukacyjnym*, Praca dyplomowa magisterska, kierunek Informatyka, Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska, Warszawa 2006.
- [7] Materiały, opracowania techniczne firmy Thomas Lord Research Center 110 Lord Driver P.O. Box 8012 Cary, NC 27512-8012.
- [8] Michalewicz Zb.: *Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne*, Warszawa, WNT 1999.
- [9] Michalewicz Zb.: *How to Solve It: Modern Heuristics*, Springer Verlag, 2000.
- [10] Popov A.: *Genetic algorithms for optimization. Programs for Matlab*, Hamburg 2005. <http://p0p0v.com/science/downloads/Popov05a.pdf>
- [11] Ruczyńska-Wdowiak K., Stefański T.: *Comparison of Classical Static Optimisation Methods and Genetic Algorithms in Parametric Identification of Induction Motor*, *International Carpathian Control Conference ICC'2001*, pp.177-182.
- [12] Ruczyńska-Wdowiak K.: *Algorytmy genetyczne w identyfikacji modelu matematycznego obiektu dynamicznego na przykładzie silnika indukcyjnego*, Rozprawa doktorska, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2005.