



**Katarzyna RUTCZYŃSKA-WDOWIAK, Michał MAKOWSKI**

**ANALIZA WPŁYWU OPERATORA  
KRZYŻOWANIA W PROBLEMIE  
IDENTYFIKACJI MODELU TŁUMIKA  
MR Z ZASTOSOWANIEM  
ALGORYTMU GENETYCZNEGO**

*Streszczenie*

*Praca przedstawia rezultaty zastosowania algorytmu genetycznego (AG) w problemie identyfikacji parametrów matematycznego modelu tłumika magneto-reologicznego (MR). Identyfikację parametrów prowadzono na podstawie badań eksperymentalnych. Przyjęty matematyczny model tłumika magneto-reologicznego opisywał zachodzące w nim zjawiska, na jego podstawie opracowano model numeryczny tłumika MR. Koncentrowano się na określeniu wpływu zastosowanego operatora krzyżowania AG na dokładność i czas procesu identyfikacji. Rozważano następujące rodzaje krzyżowania, tj.: arytmetyczne, rozproszone, heurystyczne oraz jednopunktowe.*

**WSTĘP**

Prezentowana tematyka pracy należy do obszaru tłumienia drgań w układach mechanicznych z wykorzystaniem materiałów „inteligentnych”. Rozwój elektroniki i badań prowadzonych nad materiałami inteligentnymi pozwolił na opracowanie szeregu konstrukcji sterowanych tłumików drgań, do których można zaliczyć: tłumiki magneto-reologiczne, elektro-reologiczne i tłumiki ze sterowanym zaworem piezoelektrycznym [5]. Znamiennej cechą sterowanych układów z zastosowaniem materiałów inteligentnych do dyssypacji energii jest stosunkowo krótki czas reakcji układu mechanicznego na zmianę sygnału sterowania. Tłumik magneto-reologiczny (MR) wypełniony jest specjalną cieczą, która pod wpływem pola magnetycznego zmienia lepkości. Sterowanie siłą tłumienia odbywa się poprzez dobór natężenia prądu płynącego przez uzwojenie cewki, tak aby uzyskać określoną siłę tłumienia [2, 4]. Możliwość zastosowania sterowanych tłumików drgań w obiektach technicznych wymaga znajomości ich właściwości (charakterystyk dyssypacyjnych). Poprzez zmiany natężenia prądu w układzie elektronicznym można wpływać na zmiany rozpraszanej energii. W tym celu prowadzone są badania umożliwiające opis modelu takich tłumików oraz identyfikacja ich parametrów. Sterowane tłumiki magneto-reologiczne znalazły zastosowanie w tłumieniu drgań mechanicznych w maszynach i pojazdach [14].

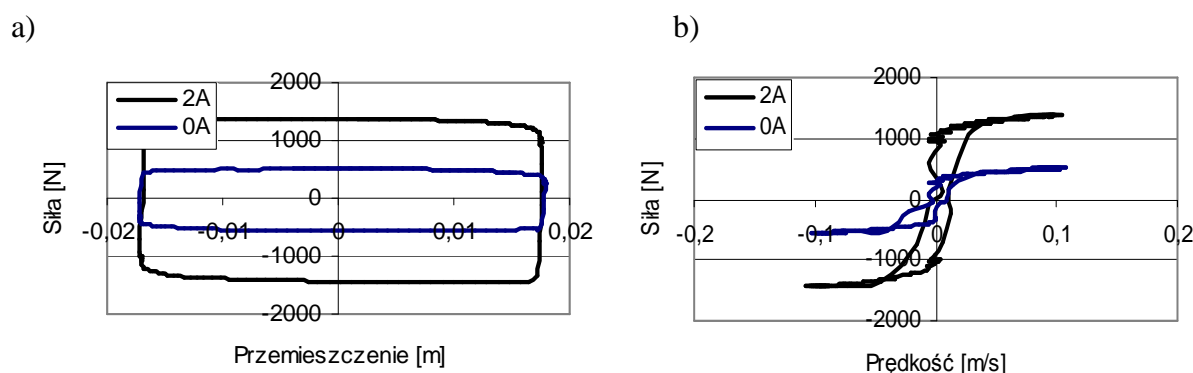
W pracy przedstawiona została identyfikacja parametrów modelu tłumika magneto-reologicznego z wykorzystaniem algorytmu genetycznego (AG), z uwzględnieniem wpływu doboru operatora krzyżowania na uzyskane wyniki. Identyfikacja parametrów modelu tłumika MR została przeprowadzona na podstawie badań eksperymentalnych, które zostały wykonane

w Instytucie Pojazdów Politechniki Warszawskiej w ramach realizacji projektu związanego z badaniem sterowanych struktur do redukcji maszyn i budynków. Do badań wykorzystano oryginalne rozwiązanie konstrukcyjne sterowanego tłumika magneto-reologicznego, który został napełniony cieczą magneto-reologiczną firmy LORD [12]. Model sterowanego tłumika MR przyjęto w postaci struktury reologicznej. Parametry modelu zostały wstępnie oszacowane na podstawie badań eksperymentalnych, a następnie zidentyfikowane przy użyciu algorytmów genetycznych [11]. Ocenę jakości rozwiązań (parametrów modelu tłumika) prowadzono wykorzystując kryterium minimalizacji różnic sił tłumienia, które uzyskano na podstawie wyników badań eksperymentalnych i numerycznych.

Wybór algorytmów genetycznych do wyznaczenia parametrów modelu tłumika MR wynika z faktu, że AG przez losowy wybór wielu osobników populacji zapewnia większą szansę zlokalizowania minimum globalnego przyjętego wskaźnika jakości identyfikacji, niż powszechniej stosowane metody klasyczne [1, 7, 8, 10]. Dla uzyskania dobrej zbieżności, dokładności oraz możliwie najkrótszego czasu analizowanego procesu identyfikacji istotny jest dobór odpowiedniej struktury algorytmu genetycznego. Niewłaściwy wybór poszczególnych „elementów” algorytmu genetycznego może być przyczyną tzw. przedwczesnej zbieżności AG lub niepotrzebnie wydłużać czas identyfikacji. Jedną z ważniejszych operacji, mających znaczący wpływ na wyniki identyfikacji jest krzyżowanie. Z uwagi na powyższe w niniejszej pracy analizowano wpływ przyjętego operatora krzyżowania na zbieżność, dokładność i czas analizowanego procesu identyfikacji matematycznego modelu tłumika MR. W tym celu wykorzystano następujące metody krzyżowania osobników populacji, a mianowicie: arytmetyczne, heurystyczne, rozproszone oraz jednopunktowe. Algorytm genetyczny zaimplementowano w środowisku Matlab z wykorzystaniem selekcji turniejowej, mutacji równomiernej, z uwzględnieniem skalowania funkcji przystosowania i migracji.

## 1. MODEL TŁUMIKA MR

Prace związane z modelowaniem tłumika MR zostały poprzedzone badaniami eksperymentalnymi, które przeprowadzono celem wyznaczenia charakterystyk dyssypacyjnych (rysunek 1).



**Rys. 1.** Wyniki badań eksperymentalnych tłumika MR z zasilaniem 2A i bez zasilania przy wymuszeniu z częstotliwością 0,8 Hz i amplitudzie 18 mm, a) siła-przemieszczenie, b) siła-prędkość

Na podstawie charakterystyk tłumika MR został przyjęty matematyczny model tłumika zaproponowany przez W. Grzesikiewicza [2] w postaci struktury reologicznej, który został przedstawiony na rysunku 2. Przyjęto założenie, że ze zmianami prądu zmienia się tylko

jeden parametr  $T_0$  obrazujący tarcie suche, pozostałe parametry powinny pozostawać bez zmian.

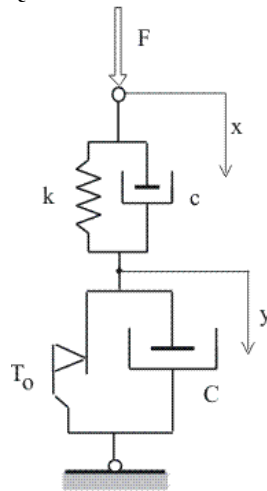
Matematyczny model tłumika magneto-reologicznego przyjmuje postać:

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

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

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

gdzie:  $C, T_0, c, k$  - liczby dodatnie charakteryzujące lepko-sprężyste cechy struktury,  
 $x, y$  - współrzędne modelu,  
 $F$  - siła działająca na strukturę.

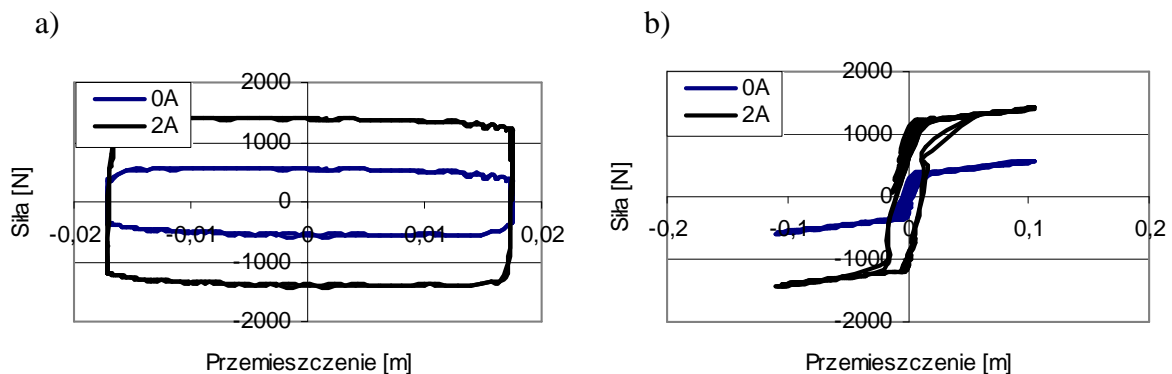


Rys. 2. Schemat struktury reologicznej tłumika MR

Na podstawie przedstawionego opisu matematycznego tłumika MR powstał program służący do badań właściwości tłumika oraz identyfikacji parametrów modelu tłumika w programie Matlab/Simulink [13].

Tab. 1. Parametry tłumika magneto-reologicznego

Natężenie prądu $I$ [A]	$T_0$ [N]	$k$ [N/m]	$C$ [Ns/m]	$c$ [Ns/m]
0	340	$2860 \cdot 10^3$	$2,24 \cdot 10^3$	$44,6 \cdot 10^3$
3A	1180	$2860 \cdot 10^3$	$2,24 \cdot 10^3$	$44,6 \cdot 10^3$

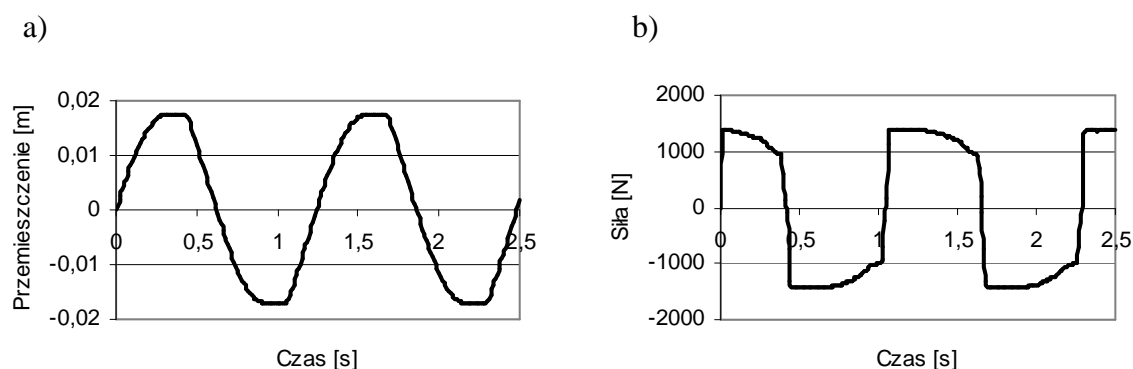


Rys. 3. Wyniki badań numerycznych tłumika MR bez zasilania i z zasilaniem 2A przy wymuszeniu z częstotnością 0,8 Hz i amplitudzie 18 mm, a) siła-przeszczenie, b) siła-prędkość

W tabeli 1 zaprezentowane zostały wstępnie wyznaczone parametry modelu tłumika MR, a na rysunku 3 przedstawiono wyniki badań numerycznych. Parametry modelu tłumika były tak wyznaczone, aby dyssypacyjne charakterystyki otrzymane w trakcie badań numerycznych były zbliżone do odpowiadających im charakterystyk z badań eksperymentalnych. Opracowany program do badań numerycznych został również wykorzystany do prowadzenia identyfikacji parametrów tłumika z wykorzystaniem algorytmów genetycznych.

## 2. IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW TŁUMIKA MR

W pracy została zaprezentowana metoda identyfikacji parametrów modelu tłumika magneto-reologicznego. Parametry tłumika zostały wyznaczone na podstawie wyników badań doświadczalnych, które przedstawiono na rysunku 4. Na rysunku 4. a) widoczne jest wymuszenie kinematycznych, a na rysunku 4. b) przebieg sił tarcia w tłumiku MR przy zasilaniu cewki prądem o natężeniu 2 A. W trakcie badań realizowano wymuszenie kinematyczne o amplitudzie 0,018 m i częstotliwości 0,8 Hz. Do identyfikacji parametrów tłumika MR wykorzystano przebieg wymuszeń kinematycznych tłumika z badań eksperymentalnych.



**Rys. 4.** Wyniki badań eksperymentalnych tłumik MR z zasilaniem 2A przy wymuszeniu z częstotnością 0,8 Hz i amplitudzie 18 mm, a) przemieszczenie, b) siła

Celem oceny jakości rozwiązań (uzyskiwanych wyników z badań numerycznych) przyjęto wskaźnik, który został przedstawiony zależnością:

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

gdzie:  $x_p$  – wynik badań eksperymentalnych,  
 $x_s$  – wynik badań numerycznych.

Przyjęty wskaźnik służył do porównań przebiegów sił w czasie na podstawie badań numerycznych i eksperymentalnych. Przedstawiona zależność (4) sprowadza się do minimalizacji wskaźnika  $W$  będącego miarą różnic wartości sił uzyskanych z badań numerycznych i eksperymentalnych.

Identyfikację parametrów modelu tłumika magneto-reologicznego prowadzono kilkoma metodami, początkowo przeprowadzono badania z zastosowaniem metody gradientowej. Przeprowadzono identyfikację parametrów tłumika MR w oparciu o badania przedstawione na rysunku 4 i uzyskano wartość wskaźnika  $W = 0,06049$ , a następnie wykorzystano AG. Algorytmy genetyczne różnią się wieloma cechami od metod klasycznych, dlatego w wielu

przypadkach pozwalają na uzyskanie „lepszyc” rezultatów (z uwagi na wartość minimalizowanego wskaźnika identyfikacji  $W$ ).

Ze względu na znaczący wpływ przyjętej struktury algorytmu genetycznego na przebieg różnych procesów, co wykazano w wielu pracach z zakresu zastosowań algorytmów genetycznych [1, 6, 7, 8, 10, 11], w niniejszej pracy koncentrowano się na wyborze odpowiedniego krzyżowania, które zdaniem wielu badaczy jest jedną z najważniejszych operacji genetycznych, a więc może mieć znaczący wpływ na wyniki analizowanego procesu. Badania dotyczyły takiego doboru operatora krzyżowania, który zapewni dobrą zbieżność identyfikacji i jak najkrótszy czas oczekiwania na wyniki. W tym celu zastosowano następujące rodzaje krzyżowania, tj.: arytmetyczne, heurystyczne, rozproszone oraz jednopunktowe. W ogólnym ujęciu zaimplementowany w środowisku Matlab algorytm genetyczny opierał swe działanie na zmiennopozycyjnej reprezentacji osobników, selekcji turniejowej oraz mutacji równomiernej.

Identyfikacja parametrów matematycznego modelu tłumika magneto-reologicznego polegała na minimalizacji wskaźnika jakości opisanego zależnością (4). W procesie identyfikacji

z zastosowaniem AG wyznaczono 4 parametry modelu tłumika MR, tj.:  $T_0$ ,  $k$ ,  $C$  oraz  $c$ . Z uwagi na specyfikę algorytmów genetycznych, które zawierają pewne elementy losowości, w badaniach podano wartości średnie wyników z 10-ciu przeprowadzonych doświadczeń; wykorzystano populacje o rozmiarze 100 osobników.

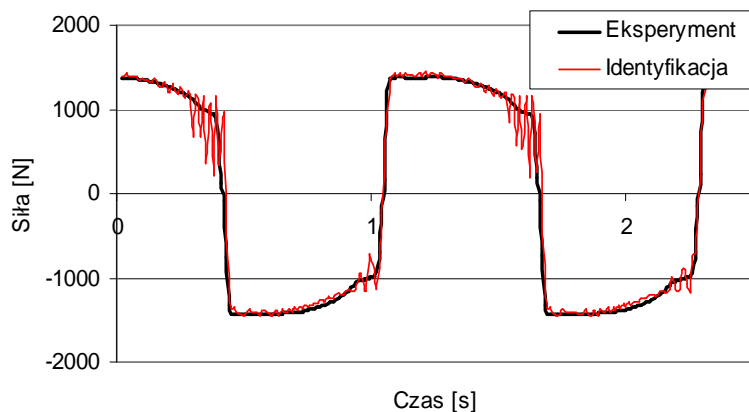
Analizę wpływu zastosowanego rodzaju krzyżowania na wyniki identyfikacji parametrów matematycznego modelu tłumika MR z zasilaniem 2A przedstawiono w tabeli 2. Przyjęto następujące oznaczenia, a mianowicie: (A) – krzyżowanie arytmetyczne, (B) - krzyżowanie rozproszone, (C) – krzyżowanie heurystyczne oraz (D) – krzyżowanie jednopunktowe.

**Tab. 2.** Analiza wpływu krzyżowania zastosowanego w algorytmie genetycznym na wyniki identyfikacji parametrów matematycznego modelu tłumika MR z zasilaniem 2A

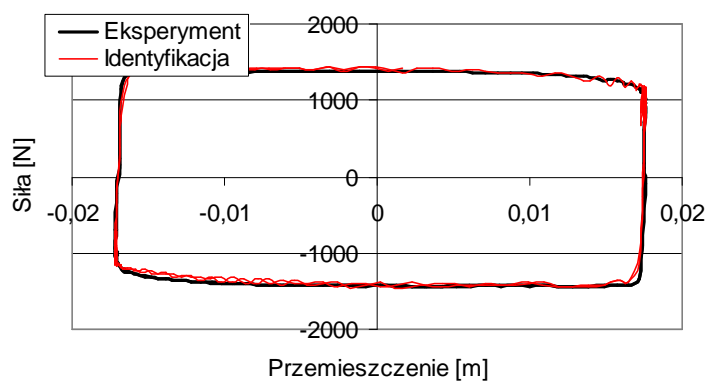
Operator krzyżowania	Średnie wartości wyznaczonych parametrów				Wskaźnik $W$	Czas [s]
	$T_0$ [N]	$k$ [N/m]	$C$ [Ns/m]	$c$ [Ns/m]		
(A)	1123	3695616	3156	26847	0,0167	445
(B)	1134	3850039	2899	25565	0,0160	427
(C)	1131	3648401	2982	27334	0,0290	420
(D)	1153	3872575	2706	26132	0,0175	424

Przedstawione wyniki badań wskazują, że zastosowana w algorytmie genetycznym metoda krzyżowania ma wpływ na otrzymane rozwiązanie. Biorąc pod uwagę wyniki średnie uzyskane w wykonanej serii badań można stwierdzić, że statystycznie najlepszą dokładność procesu identyfikacji uzyskano stosując krzyżowanie rozproszone, natomiast najgorszą – przy wykorzystaniu krzyżowania heurystycznego. Natomiast oceniając czas identyfikacji metodą najszybszą okazało się krzyżowanie heurystyczne, a najwolniejszą – krzyżowanie arytmetyczne. W pozostałych przypadkach uzyskano niewielkie różnice czasu trwania procesu i dlatego zastosowanych operatorów nie należy dyskwalifikować.

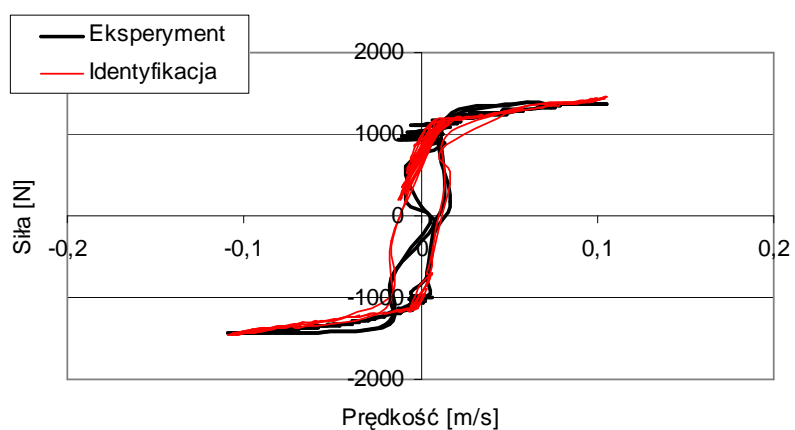
Na rysunku 5 pokazano porównanie przebiegu sił przy wymuszeniu z częstotliwością 0,8 Hz i amplitudzie 18 mm z pomiaru (linia pogrubiona) oraz rozwiązania matematycznego modelu tłumika MR z zastosowaniem AG dla rezultatu otrzymanego przy użyciu krzyżowania rozproszonego (linia cienka). Na rysunku 6 przedstawiono charakterystykę tłumika magneto-reologicznego w płaszczyźnie siła-przemieszczenie, a na rysunku 7 w płaszczyźnie siła-prędkość.



**Rys. 5.** Siła w czasie przy wymuszeniu z częstotliwością 0,8 Hz i amplitudzie 18 mm, wynik z eksperymentu z zasilaniem 2A i identyfikacji z zastosowaniem AG z krzyżowaniem rozproszonym



**Rys. 6.** Charakterystyka siła-przeszczenie z badań eksperymentalnych z zasilaniem 2A i identyfikacji z zastosowaniem AG z krzyżowaniem rozproszonym



**Rys. 7.** Charakterystyka w płaszczyźnie siła-prędkość z badań eksperymentalnych z zasilaniem 2A i identyfikacji z zastosowaniem AG z krzyżowaniem rozproszonym

Porównując zamieszczone charakterystyki otrzymane na podstawie rozwiązań matematycznego modelu tłumika MR i badań eksperymentalnych można stwierdzić, że uzyskano dobrą zbieżność przebiegów.

## PODSUMOWANIE

Przedstawione w pracy wyniki badań zostały poprzedzone badaniami eksperymentalnymi, na podstawie których został przyjęty matematyczny model tłumika MR. Badania numeryczne przeprowadzono z wykorzystaniem programu Matlab/Simulink. Charakterystyki dyssypacyjne tłumika magneto-reologicznego posłużyły do wstępnego wyznaczenia parametrów modelu tłumika MR. Przeprowadzono identyfikację z wykorzystaniem metody gradientowej, a w celu porównania otrzymanych rozwiązań posłużono się algorytmami genetycznymi. Do oceny wyznaczonych parametrów wprowadzono kryterium jakości  $W$ . Zastosowanie wybranych algorytmów genetycznych zapewniło poprawę wartości wskaźnika jakości identyfikacji, w stosunku do metody gradientowej. Jednak oceniając przydatność algorytmów genetycznych w problemach identyfikacji należy we właściwy sposób wybrać odpowiednie metody realizujące poszczególne operacje genetyczne, tak aby m.in. zapobiec zjawisku przedwczesnej zbieżności AG i aby czas procesu był możliwie krótki. Ze względu na kluczową rolę operacji krzyżowania na wyniki wielu procesów, co wykazano w pracach [1, 7, 10], w niniejszej pracy koncentrowano się na wyborze takiej metody krzyżowania, która zapewni dobrą jakość identyfikacji parametrów tłumika MR w jak najkrótszym czasie.

Na podstawie uśrednionych wyników badań można stwierdzić, że najlepszą z uwagi na najmniejszą uzyskaną wartość wskaźnika jakości identyfikacji  $W$  okazało się krzyżowanie rozproszone, natomiast najgorsze – krzyżowanie heurystyczne. Natomiast z uwagi na najkrótszy czas procesu identyfikacji najlepszy wynik otrzymano przy zastosowaniu operatora krzyżowania heurystycznego, a najgorszy za pomocą operatora krzyżowania arytmetycznego.

Porównując charakterystyki tłumika wyznaczone na podstawie badań eksperymentalnych i otrzymane z rozwiązania matematycznego modelu tłumika MR w procesie identyfikacji z zastosowaniem algorytmów genetycznych można stwierdzić dobrą zgodność uzyskanych przebiegów. Na tej podstawie sformułowano wniosek, że przyjęto poprawny model tłumika MR oraz poprawnie przeprowadzono identyfikację na podstawie przyjętej struktury AG.

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”.

## THE ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF CROSSOVER OPERATOR IN THE IDENTIFICATION PROBLEM OF THE MR DAMPER MODEL WITH THE USE OF GENETIC ALGORITHM

### *Abstract*

*This paper presents the results of genetic algorithm (GA) application in the identification of mathematical model of a magneto-rheological damper parameters. 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.*

*The results of research the influence of crossover operator on process of searching the solution with the use of genetic algorithm were analyzed. One considered following methods of the crossover: arithmetic, scattered, heuristic and single point.*

## **BIBLIOGRAFIA**

1. Goldberg D. E.: *Algorytmy genetyczne i ich zastosowania*. Warszawa, WNT 1995.
2. 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.
3. Kokkoras F., Paraskevopoulos K.: *GAs Exercise*,  
[http://rad.ihu.edu.gr/fileadmin/labsfiles/decision\\_support\\_systems/lessons/genetic\\_algorithms/GAs.pdf](http://rad.ihu.edu.gr/fileadmin/labsfiles/decision_support_systems/lessons/genetic_algorithms/GAs.pdf)
4. Knap L., Grzesikiewicz W., Makowski M.: *Experimental studies and modeling of mechanical systems with controlled torsional magneto-rheological damper*. *Logistyka* 6/2010. ISSN 1231-5478
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. Michalewicz Zb.: *Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne*. Warszawa, WNT 1999.
8. Michalewicz Zb.: *How to Solve It: Modern Heuristics*. Springer Verlag, 2000.
9. Popov A.: *Genetic algorithms for optimization. Programs for Matlab*. Hamburg 2005.  
<http://p0p0v.com/science/downloads/Popov05a.pdf>
10. Ruczyńska-Wdowiak K.: *Algorytmy genetyczne w identyfikacji modelu matematycznego obiektu dynamicznego na przykładzie silnika indukcyjnego*. Rozprawa doktorska, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2005.
11. Ruczyńska-Wdowiak K., Makowski M.: *Analiza wpływu wybranych parametrów algorytmu genetycznego w problemie identyfikacji modelu tłumika MR*. *Logistyka* 3/2012, s. 1935-1942, ISSN 1231-5478.
12. [www.lord.com](http://www.lord.com) - *Magneto-Rheological Fluid*
13. [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com) – *Matlab/tutorial*
14. Zajac M., Grzesikiewicz W., Makowski M.: *Wpływ sterowania tłumikiem MR na ograniczenie drgań pojazdu patrolowego*. *Zeszyty Naukowe WSOWL*, Nr 1 (159) 2011, s. 294-301, ISSN 1731-8157.

**Autorzy:**

**dr Katarzyna RUTCZYŃSKA-WDOWIAK** – Politechnika Świętokrzyska

**dr Michał MAKOWSKI** – Politechnika Warszawska