

Bogna MRÓWCZYŃSKA, Tadeusz BURCZYŃSKI

## ALGORYTMY EWOLUCYJNE W PROCESIE PROJEKTOWANIA KOLEJOWYCH ZESTAWÓW KOŁOWYCH

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono zastosowanie algorytmów ewolucyjnych do optymalizacji kształtu przekroju osiowego tarczy koła kolejowego zestawu kołowego. Efektywną ocenę funkcji przystosowania zgodnie z kryterium wytrzymałościowym umożliwił model numeryczny zestawu zbudowany za pomocą metody elementów skończonych.

### EVOLUTIONARY ALGORITHMS IN DESIGN OF RAILWAY WHEEL SET

**Summary.** The paper deals with an application of evolutionary algorithms to optimisation of the shape of the wheel's axial section in the railway wheel set. The fitness function, expressed by assembly stresses, is evaluated by the finite element method. Numerical optimisation for the wheel set under multiple loads is presented.

#### 1. WPROWADZENIE

Bezpieczeństwo transportu kolejowego oraz obniżenie kosztów eksploatacji zależą w dużym stopniu od tego, czy kolejowe zestawy kołowe mają dostateczną wytrzymałość i sztywność w wymaganym okresie eksploatacyjnym. Jedną z istotniejszych cech, od których zależy wyężenie całego zestawu, jest kształt przekroju osiowego tarczy koła. Na wielkość naprężeń w zestawie wpływają także wartości wcisku w połączeniu wciskowym koła z osią.

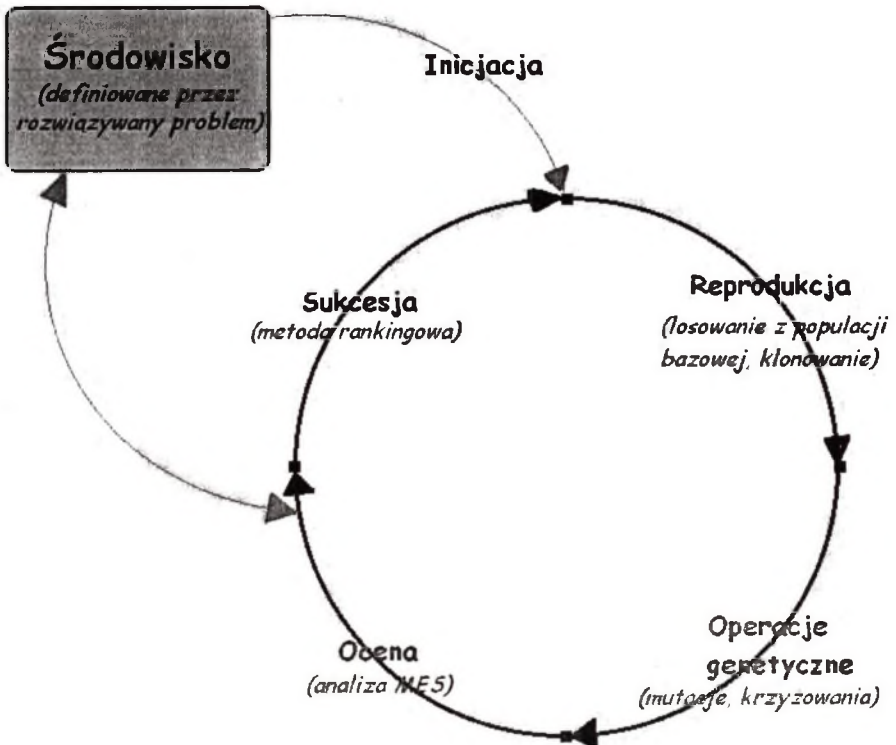
Proces konstruowania rozumieć można jako proces doboru geometrycznych, materiałowych i dynamicznych cech konstrukcyjnych. Dobór cech konstrukcyjnych rozpatrywać można w kategoriach algorytmu ewolucyjnego, który jest jedną z najnowszych metod optymalizacji. W artykule przedstawiono zastosowanie algorytmów ewolucyjnych i metody elementów skończonych do optymalizacji kształtu przekroju osiowego tarczy koła oraz optymalizacji rozkładu wartości wcisku w połączeniu wciskowym koła z osią.

#### 2. ALGORYTM EWOLUCYJNY

Proces ewolucyjny przebiega cyklicznie w kilku etapach (rys.1). Jeden cykl obejmuje jedno pokolenie osobników. Odpowiednikiem osobnika jest jedna z możliwych wersji konstrukcji przedstawiona formalnie w postaci jego chromosomu. Geny zawarte w chromosomie są zapisem liczbowym cech konstrukcyjnych. Proces konstruowania jest zatem procesem poszukiwania osobnika, który zapewnia najlepsze przystosowanie. Proces ten rozpatrywany w kategoriach algorytmu ewolucyjnego przeprowadzany jest na zbiorze osobników (populacji konstrukcji). W każdym pokoleniu następują: reprodukcja, operacje genetyczne, ocena i sukcesja.

**Reprodukcja** polega na powielaniu osobników wylosowanych z nowego pokolenia bazowego. Nowe pokolenie bazowe otrzymuje się na koniec poprzedniego cyklu. Początkową populację bazową otrzymuje się generując pierwotne osobniki.

Pokolenie bazowe poddaje się **operacjom genetycznym**, które polegają na losowej wymianie genów pomiędzy rodzicami (krzyżowanie) oraz przekształcaniu genów (mutacja). Tak przekształcone osobniki tworzą populację potomną. Poddawanie osobników operacjom genetycznym dla optymalizowanej konstrukcji jest etapem dopasowywania jednych cech konstrukcyjnych do drugih, wymiany pomysłów, zmiany wymiarów.



Rys.1. Przebieg procesu ewolucyjnego

Fig.1. Evolutionary optimisation

Osobniki „dorosłego” pokolenia potomnego są poddawane **ocenie przystosowania**. W zadaniu tu omawianym, do oceny przystosowania konstrukcji jest stosowana metoda elementów skończonych.

**Etap sukcesji** polega na tworzeniu nowej populacji bazowej z populacji potomnej i starej populacji bazowej. To etap, w którym konstruktor przygląda się swoim starym oraz nowym pomysłom i wybiera najlepsze rozwiązania.

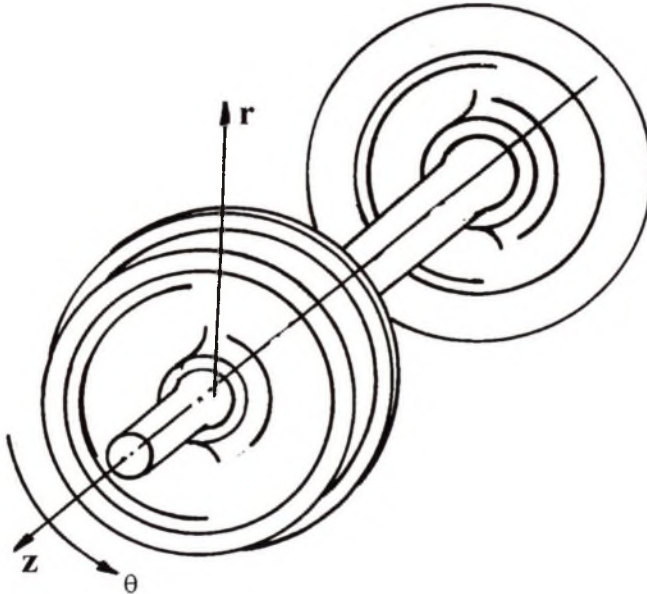
### 3. MODEL NUMERYCZNY

Analizę wytrzymałościową zestawu kołowego przeprowadzono za pomocą metody elementów skończonych (MES). Zestaw kołowy rozpatrywano jako przestrzenne ciało sprężyste mające geometrię o osiowej symetrii (rys.2).

Przyjęto złożony stan obciążenia pochodzący od wciskowego połączenia koła z osią, obciążeń niesymetrycznych oddziaływania szyn oraz obciążenia termicznego pochodzącego od hamowania. W przypadku obciążeń niesymetrycznych zadanie zamodelowano szeregami Fouriera i rozwiązano jako osiowosymetryczne dla każdego składnika szeregu. Obciążenia termiczne pochodzące od hamowania można traktować jako osiowosymetryczne, gdyż koło w trakcie hamowania nie powinno być całkowicie zablokowane i źródło ciepła powstającego w wyniku tarcia klocka hamulcowego o powierzchnię toczną koła przesuwają się wzdłuż tej powierzchni.

Przyjęto liniowo-sprężysty model materiału. Naprężenia redukowane wyznaczono według hipotezy energii odkształcenia postaciowego Hubera – Misesa – Hencky’ego. W kołach monoblokowych dla osi włączanej na zimno, przy próbie trwałości połączenia przy sile włączania  $P_w = 1200$  kN nie powinno zachodzić przesunięcie koła względem osi. Wynika z tego warunek, że połączenie jest trwałe, gdy siła tarcia

$$T \geq P_w \quad (1)$$



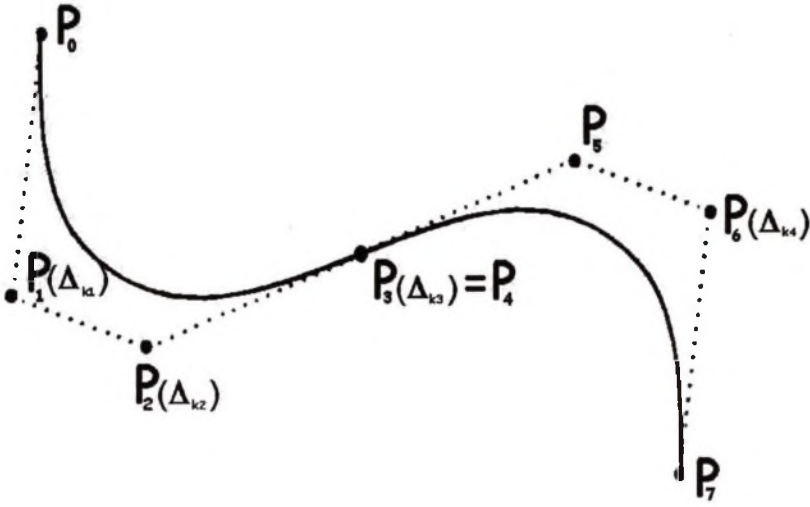
Rys.2. Model zestawu kołowego  
Fig.2. Model of wheel set

Przemieszczenia w kierunku osiowym na wieńcu koła powinny spełniać następujące warunki:

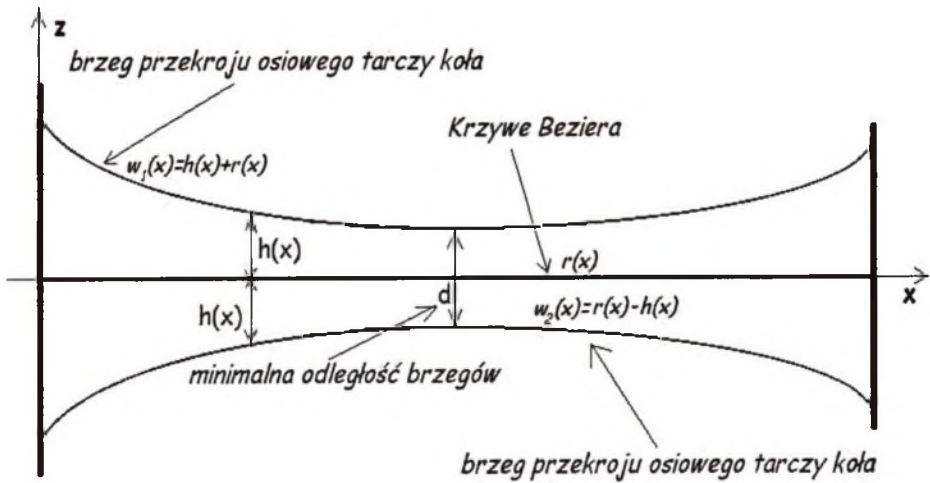
$$-0,5 \text{ mm} \leq u_z \leq 1,0 \text{ mm} \quad (2)$$

Kształt przekroju osiowego tarczy koła został zamodelowany wielomianami Bèziera (rys.3, 4). Każdy punkt kontrolny  $P_i$  ma dwie współrzędne  $(R_i, Z_i)$ , gdzie

$$\Delta_{k1} = Z_1 \quad \Delta_{k2} = Z_2 \quad \Delta_{k3} = Z_3 \quad \Delta_{k4} = Z_4$$

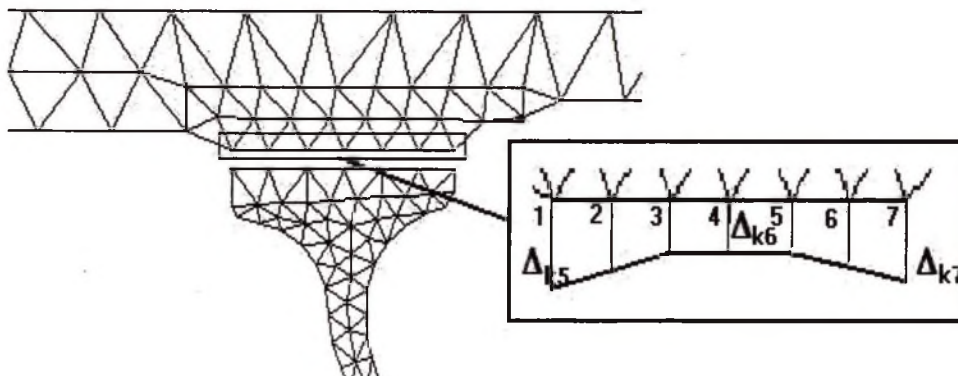


Rys.3. Krzywa Bèziera  
Fig.3. Polynomials of Bèzier



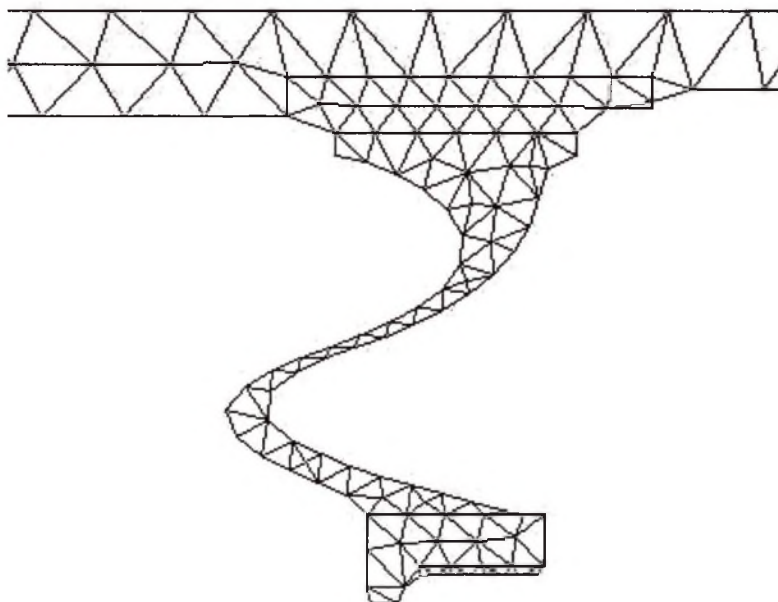
Rys.4. Modelowanie brzegu przekroju osiowego tarczy koła  
Fig.4. Polynomials of Bèzier shaped axial section of the wheel

Rozkład wartości wcisku w połączeniu wciskowym kołem z osią jest odcinkami liniowy (rys.5).



Rys.5. Model rozkładu wartości wcisku  
Fig.5. Linear distribution of interference

Tarcza o nowym kształcie modelowana jest elementami skończonymi (rys.6).



Rys.6. Osiowosymetryczny model MES zestawu kołowego  
Fig.6. Axisymmetric model of wheel set

Przyjęto funkcję przystosowania w postaci

$$J = \Gamma^{-1} \quad (3)$$

gdzie

$$I = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} \left[ \frac{\sigma_{red}}{\sigma_0} \right]^N d\Omega \quad (4)$$

oraz

$\sigma_{red}$  – napężenie redukowane,  
 $\sigma_0$  – stała,  $\sigma_0 > 0$ ,  
 $\Omega$  - obszar zajmowany przez zestaw kołowy,  
 $N > 1$ .

Ograniczenia (1) i (2) zostały uwzględnione w postaci funkcji kary:

$$I' = \begin{cases} I & \text{dla } T \geq 1200kN \wedge -0.5 \text{ mm} \leq u_z \leq 1 \text{ mm} \\ 10 \cdot I & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (5)$$

stąd funkcja przystosowania przyjmuje postać

$$J = (I')^{-1} \quad (6)$$

$k$  - ty chromosom populacji reprezentujący wektor zmiennych projektowych ma postać

$$\Delta_k = \langle \Delta_{k1}, \Delta_{k2}, \dots, \Delta_{k7} \rangle \quad (7)$$

Geny  $\Delta_{ki}$  dla  $i=1, \dots, 4$  reprezentują parametry kontrolne wielomianu Bèziera (rys.3), a dla  $i=5, \dots, 7$  – wartości wcisku (rys.5). Na geny przyjęto następujące ograniczenia

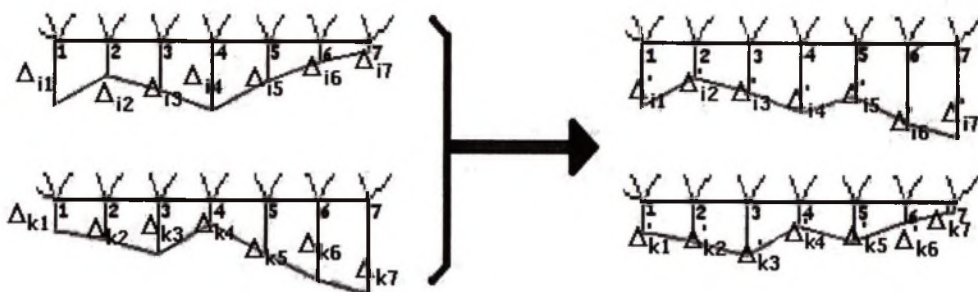
$$O_{11} = 125 \text{ mm} \leq \Delta_{k1} \leq 135 \text{ mm} = O_{21} \quad (8)$$

$$O_{1i} = 600 \text{ mm} \leq \Delta_{ki} \leq 900 \text{ mm} = O_{2i}, \quad i = 2, 3, 4 \quad (9)$$

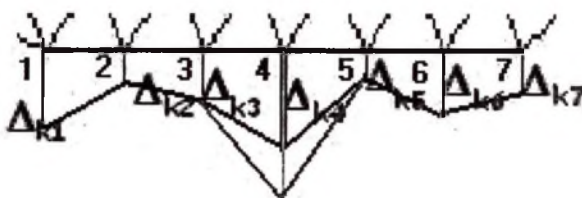
$$O_{1i} = 0.1 \text{ mm} \leq \Delta_{ki} \leq 0.3 \text{ mm} = O_{2i}, \quad i = 5, 6, 7 \quad (10)$$

Do obliczeń zastosowano algorytm ewolucyjny, w którym wykorzystano operatory mutacji (równomiernej, nierównomiernej i brzegowej), krzyżowania (arytmetycznego, heurystycznego i nierównomiernego), selekcji rankingowej i klonowania. Rozwiązanie uzyskano po zminimalizowaniu funkcjonału (6) ze względu na  $\Delta_k$ .





Rys.7. Operator krzyżowania przekształcający wciski  
 Fig.7. Operator of crossover



Rys.8. Operator mutacji przekształcający wciski  
 Fig.8. Operator of mutation

#### 4. WYNIKI OPTYMALIZACJI

Wyniki optymalnego kształtowania przekroju osiowego tarczy koła oraz rozkładu wartości wcisku przy działaniu wszystkich obciążeń, wartości prawdopodobieństw operatorów genetycznych i fenotypy chromosomów zestawiono w tabeli 1.


Wartości funkcji przystosowania różnią się w granicach 15%. Dla projektów otrzymanych w wyniku większości procesów ewolucyjnych przekrój osiowy tarczy koła ma kształt wygięty w kierunku środka zestawu, a wcisk jest rozłożony równomiernie. Podobne wyniki uzyskiwane we wszystkich procesach ewolucji dowodzą stabilności rozwiązania. Zastosowanie ograniczeń w formie funkcji kary postaci (5) spowodowało zachowanie przez uzyskiwane rozwiązania wszystkich żądanych warunków.

Jako rozwiązanie optymalne wybrano wariant 2S (rys.9) o najwyższej wartości funkcji przystosowania. W wariantcie 2S maksymalne naprężenia zredukowane nie są najniższe, ale są równomierniej rozłożone. Kształt wariantu 2S jest typowym kształtem otrzymanym jako wynik większości przeprowadzonych procesów ewolucji.

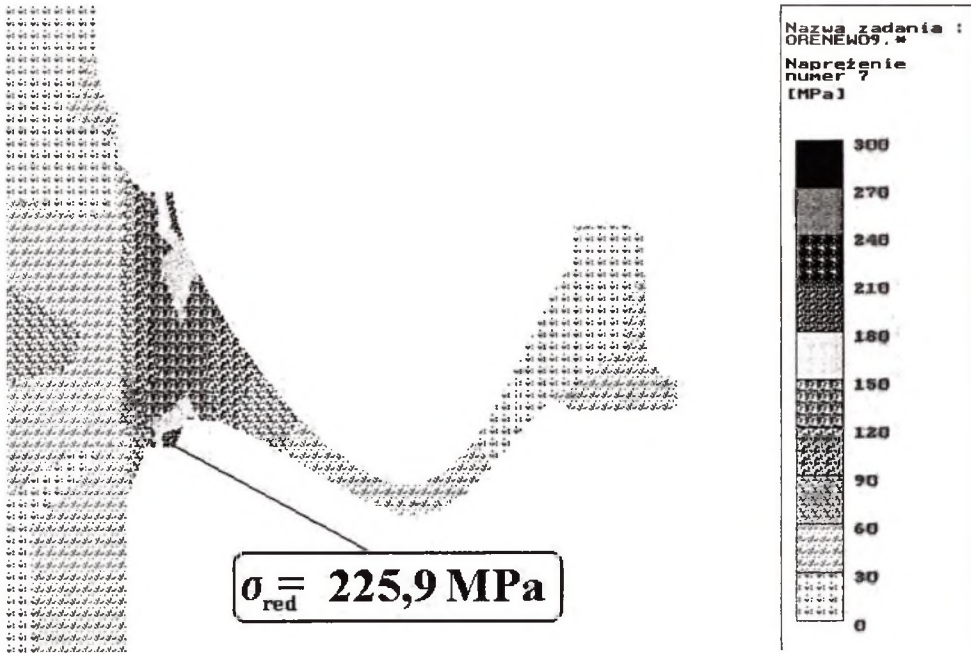
Wariant 2S charakteryzuje się małymi przemieszczeniami osiowymi na wieńcu koła (rys.6) i prawie równomiernym rozkładem wcisku, co powoduje względnie niskie naprężenia zredukowane na styku koła z osią.

Wyniki optymalizacji kształtu tarczy koła, wielkości i kształtu połączenia wciskowego oraz analizy wytrzymałościowej wybranych zestawów, w zestawach obciążonych równocześnie: montażem, eksploatacją i hamowaniem

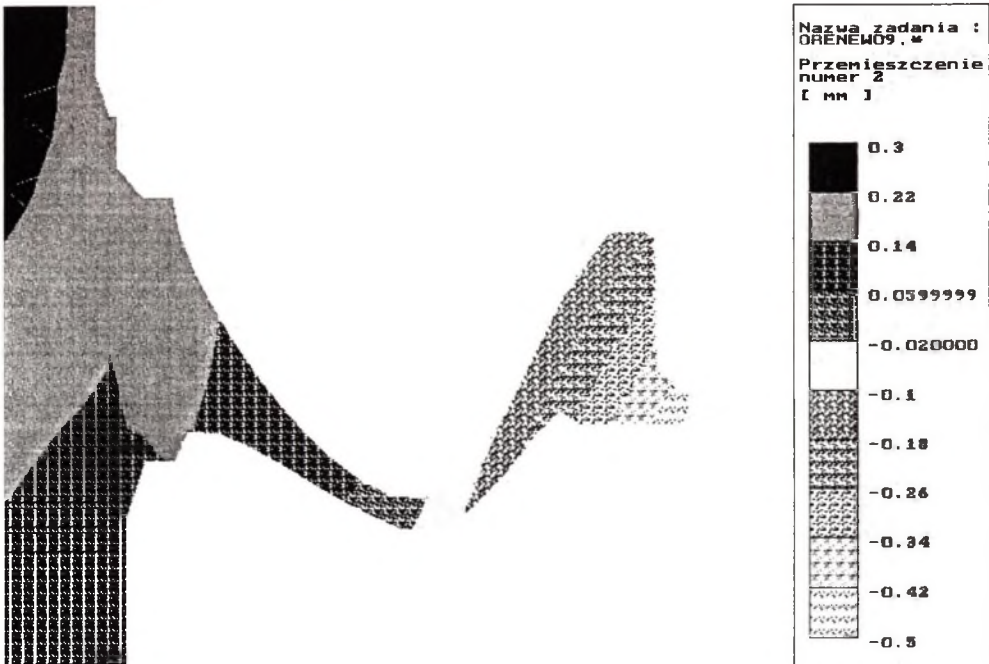
Wariant	Populacja	Liczba pokoleń	Nr pokolenia, w którym uzyskano rozwiązanie	Wartość funkcji przystosowania	Maksymalne $\sigma_{red}$ [MPa]	Prawdopodobieństwa zastosowania operatorów genetycznych											Chromosomy optymalnych osobników							
						krzyżowania nierównomiernego	krzyżowania heurystycznego	krzyżowania atrymetycznego	mutacji równomiernej	mutacji nierównomiernej	mutacji brzegowej	selekcji rakingowej	klonowania	geny kształtu tarczy				geny wcisku						
1	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24				
1S	100	100	100	7.8	260.0	0.02	0.03	0.01	0.5	0.3	0.14	0.03	0.4	134.9	635.1	671.5	715.6	.137	.105	.057				
<b>2S</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>69</b>	<b>7.5</b>	<b>225.9</b>	<b>0.02</b>	<b>0.03</b>	<b>0.01</b>	<b>0.5</b>	<b>0.3</b>	<b>0.14</b>	<b>0.03</b>	<b>0.4</b>	<b>127.0</b>	<b>646.9</b>	<b>619.4</b>	<b>737.8</b>	<b>.110</b>	<b>.113</b>	<b>.118</b>				
3S	100	200	169	7.5	230.5	0.02	0.03	0.01	0.5	0.3	0.14	0.03	0.4	134.9	821.9	826.0	766.0	.094	.107	.129				
4S	200	200	52	7.5	543.0	0.02	0.03	0.01	0.5	0.3	0.14	0.03	0.4	128.4	655.6	619.6	741.5	.138	.107	.115				
5S	300	100	13	7.5	223.4	0.05	0.05	0.05	0.25	0.25	0.25	0.1	0.5	126.6	844.0	819.4	788.9	.094	.106	.122				
6S	100	100	5	7.5	304.9	0.02	0.03	0.01	0.5	0.3	0.14	0.03	0.4	125.6	789.6	684.5	740.5	.183	.096	.122				
7S	100	200	69	7.4	211.0	0.05	0.05	0.05	0.25	0.25	0.25	0.1	0.5	126.9	722.1	648.0	737.3	.106	.114	.123				
8S	100	200	29	7.4	210.9	0.05	0.05	0.05	0.25	0.25	0.25	0.1	0.5	125.2	686.9	639.6	706.9	.103	.115	.121				
9S	300	100	14	7.4	249.4	0.05	0.05	0.05	0.25	0.25	0.25	0.1	0.5	127.5	735.8	658.6	730.4	.129	.109	.119				
10S	300	300	22	7.4	262.2	0.05	0.05	0.05	0.25	0.25	0.25	0.1	0.5	131.6	713.0	645.2	750.8	.158	.107	.087				
11S	300	200	22	7.4	202.8	0.02	0.03	0.01	0.5	0.3	0.14	0.03	0.4	129.5	715.7	647.3	764.6	.108	.115	.116				
12S	400	400	21	7.4	233.5	0.02	0.03	0.01	0.5	0.3	0.14	0.03	0.4	125.7	667.0	629.5	706.5	.122	.117	.077				
13S	100	400	55	7.4	489.9	0.05	0.05	0.05	0.25	0.25	0.25	0.1	0.5	126.7	743.8	663.3	745.3	.138	.106	.125				
14S	300	600	13	7.4	219.6	0.05	0.05	0.05	0.25	0.25	0.25	0.1	0.5	131.6	702.6	639.6	755.6	.115	.113	.120				
15S	100	300	135	7.3	476.7	0.02	0.03	0.01	0.5	0.3	0.14	0.03	0.4	125.7	738.2	661.0	738.0	.089	.112	.134				
16S	100	100	16	7.3	229.4	0.05	0.05	0.05	0.25	0.25	0.25	0.1	0.5	132.5	664.6	616.0	772.0	.120	.118	.086				
17S	100	400	20	7.3	248.9	0.05	0.05	0.05	0.25	0.25	0.25	0.1	0.5	132.7	745.3	668.0	736.3	.147	.110	.096				
18S	100	300	65	7.3	216.3	0.05	0.05	0.05	0.25	0.25	0.25	0.1	0.5	128.8	721.9	651.8	750.7	.087	.118	.125				
19S	400	100	13	7.3	207.0	0.05	0.05	0.05	0.25	0.25	0.25	0.1	0.5	125.0	603.4	600.0	756.3	.102	.121	.116				
20S	300	300	6	7.3	232.1	0.02	0.03	0.01	0.5	0.3	0.14	0.03	0.4	131.7	744.6	669.7	740.7	.133	.116	.075				
21S	100	400	35	6.6	336.5	0.02	0.03	0.01	0.5	0.3	0.14	0.03	0.4	125.2	720.1	637.4	777.7	.069	.109	.213				

Oznaczenia  rozwiązanie optymalne





Rys.9. Naprężenia redukowane w zestawie kołowym po superpozycji – wariant 2S  
Fig.9. Equivalent stresses in wheel set - variant 2S



Rys.10. Przemieszczenie w kierunku osiowym wariant 2S  
Fig.10. Axial displacements in wheel set - variant 2S

## 5. WNIOSKI

Przeprowadzone obliczenia ewolucyjne wykazują, że połączenie algorytmów ewolucyjnych z metodą elementów skończonych jest skuteczną techniką sztucznej inteligencji służącą do optymalizacji tak złożonego zadania. Otrzymany optymalny projekt zestawu kołowego spełnia wymagane kryteria i zachowuje przyjęte ograniczenia. Algorytm ewolucyjny bardzo szybko reaguje na ograniczenia wprowadzone w postaci funkcji kary.

## Literatura

1. Mrówczyńska B., Burczyński T.: Evolutionary optimisation of interference joint in railway wheel set. *Methods of Artificial Intelligence in Mechanics and Mechanical Engineering*, Gliwice 2001, s. 155-158.
2. Mrówczyńska B., Burczyński T.: Evolutionary algorithms to design the railway wheel set. *Methods of Artificial Intelligence in Mechanics and Mechanical Engineering*, Gliwice 2002, s.
3. Mrówczyńska B., Burczyński T.: Zastosowanie algorytmów ewolucyjnych do projektowania zestawów kołowych. *Maszyny Dźwigowo-Transportowe*, nr 3, 2002, Bytom 2002.
4. Mrówczyńska B.: Zastosowanie algorytmów ewolucyjnych i metody elementów skończonych w optymalizacji zestawów kołowych pojazdów szynowych. Praca doktorska. Gliwice 2002.
5. Mrówczyńska B., Matyja T.: Modele numeryczne połączenia wciskowego w zestawach kołowych. *Maszyny Dźwigowo-Transportowe*, nr 4, 2002, Bytom 2002.
6. Matyja T., Mrówczyńska B.: Modelowanie połączeń odkształceniowych w kolejowych zestawach kołowych. *XLI Sympozjon PTMTS Modelowanie w Mechanice*. Wisła 2002.
7. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L.: *The finite element method*. Butterworth – Hainemann, Oxford 2000.

Recenzent: Doc. dr inż. Roman Bąk

## Abstract

The problem of minimization the effort of the railway wheel set is very important. The railway traffic safety depends on it. This problem can be solved by the evolutionary algorithm. The shape of the wheel's axial section in the railway wheel set and the interference joint between the wheel and the axle were optimised. The fitness function, expressed by assembly stresses, is evaluated by the finite element method. Numerical optimisation for the wheel set under multiple loads is presented.

The results of evolutionary optimization are presented.

*Pracę zrealizowano w ramach pracy BW-467/RM10-3/2002.*