

Adam MAŃKA, Marek SITARZ

WYKORZYSTANIE METOD SZTUCZNEJ INTELIGENCJI DO AUTOMATYCZNEGO PROJEKTOWANIA I OPTYMALIZACJI KONSTRUKCJI NA PRZYKŁADZIE KOŁA KOLEJOWEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono przykład wykorzystania algorytmu ewolucyjnego, który w połączeniu z autorskim oprogramowaniem oraz programem wykorzystującym metodę elementów skończonych pozwala na w pełni automatyczne i niezależne od człowieka projektowanie i optymalizację konstrukcji kół kolejowych.

Słowa kluczowe. Projektowanie kół kolejowych, sztuczna inteligencja, optymalizacja

ARTIFICIAL INTELLIGENT METHOD USING FOR AUTOMATIC DESIGNING AND CONSTRUCTION OPTIMIZATION ON RAILWAY WHEEL EXAMPLE

Summary. The article presents an example of using an evolutionary algorithm, which in combination with authorship software and software using the FEM allows for a automatic and independent of human designing and construction optimization of railway wheels.

Keywords. Railway wheel designing, artificial intelligence, optimization

1. WPROWADZENIE

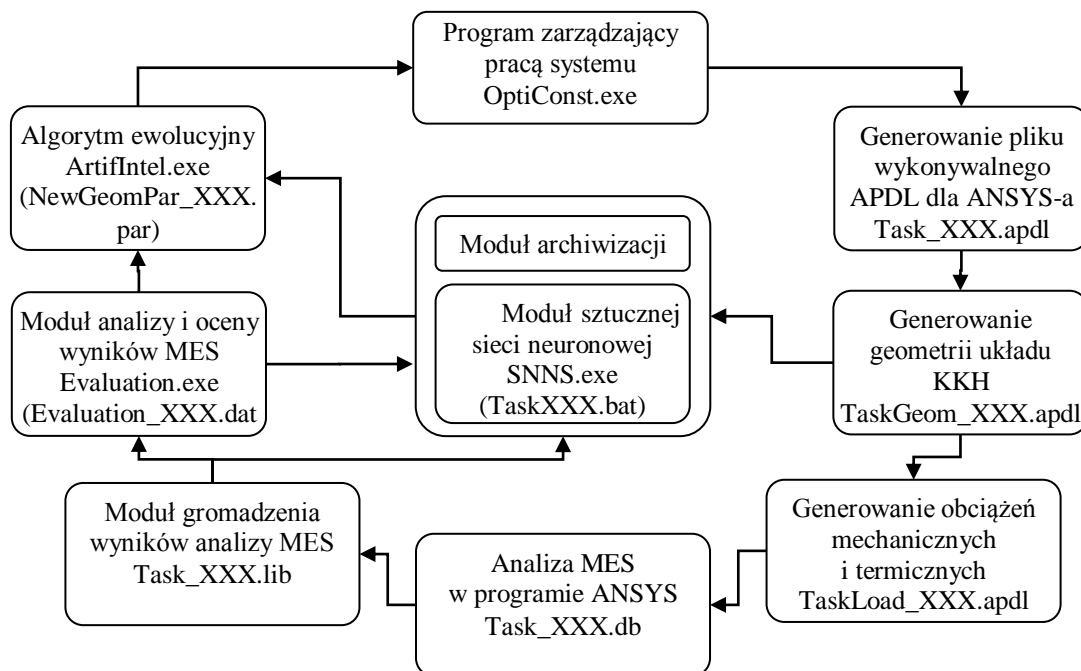
Znaczący rozwój techniki, wzrost wymagań dotyczący prędkości i komfortu podróżowania oraz konieczność redukcji kosztów przy jednoczesnej potrzebie poprawy bezpieczeństwa w transporcie, stawiają ogromne wyzwania dla projektantów i producentów tej branży. Równocześnie pojawiły się nowe możliwości wspomagania działań człowieka w zakresie nie tylko zarządzania i pomiarów, ale również do projektowania i optymalizacji nowych konstrukcji. Ciągłe prace nad zwiększeniem możliwości i ułatwieniem wykorzystania oprogramowania do projektowania i weryfikacji konstrukcji w istotny sposób spopularyzowały prowadzenie analiz z wykorzystaniem metod numerycznych, zarówno dla weryfikacji konstrukcji poddanych obciążeniom mechanicznym, statycznym czy dynamicznym obciążeniom termicznym jak i analizy zachowania się strugi cieczy w otoczeniu badanej konstrukcji, wraz z jej interakcją. Rozwojowi temu sprzyja ciągły wzrost mocy obliczeniowej komputerów osobistych, który pozwala już na dokonywanie analiz, których przeprowadzenie do niedawna było możliwe wyłącznie na klastrach obliczeniowych [2, 3]. Bazując jednocześnie na wcześniejszych doświadczeniach Katedry Transportu Szynowego Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej w zakresie wykorzystania metod sztucznej inteligencji w tym algorytmów genetycznych i sztucznych sieci neuronowych, do

optymalizacji, sterowania i analizy obrazu, podjęto się próby opracowania takiego oprogramowania komputerowego, które w sposób automatyczny kreowałoby nowe rozwiązania konstrukcyjne, przy jednoczesnych ich ocenie i optymalizacji, a następnie, bazując na zdobytej wiedzy, kreowałoby kolejne rozwiązania zgodne z narzuconymi przez człowieka ograniczeniami i założonym celem optymalizacji [2, 3, 4, 5].

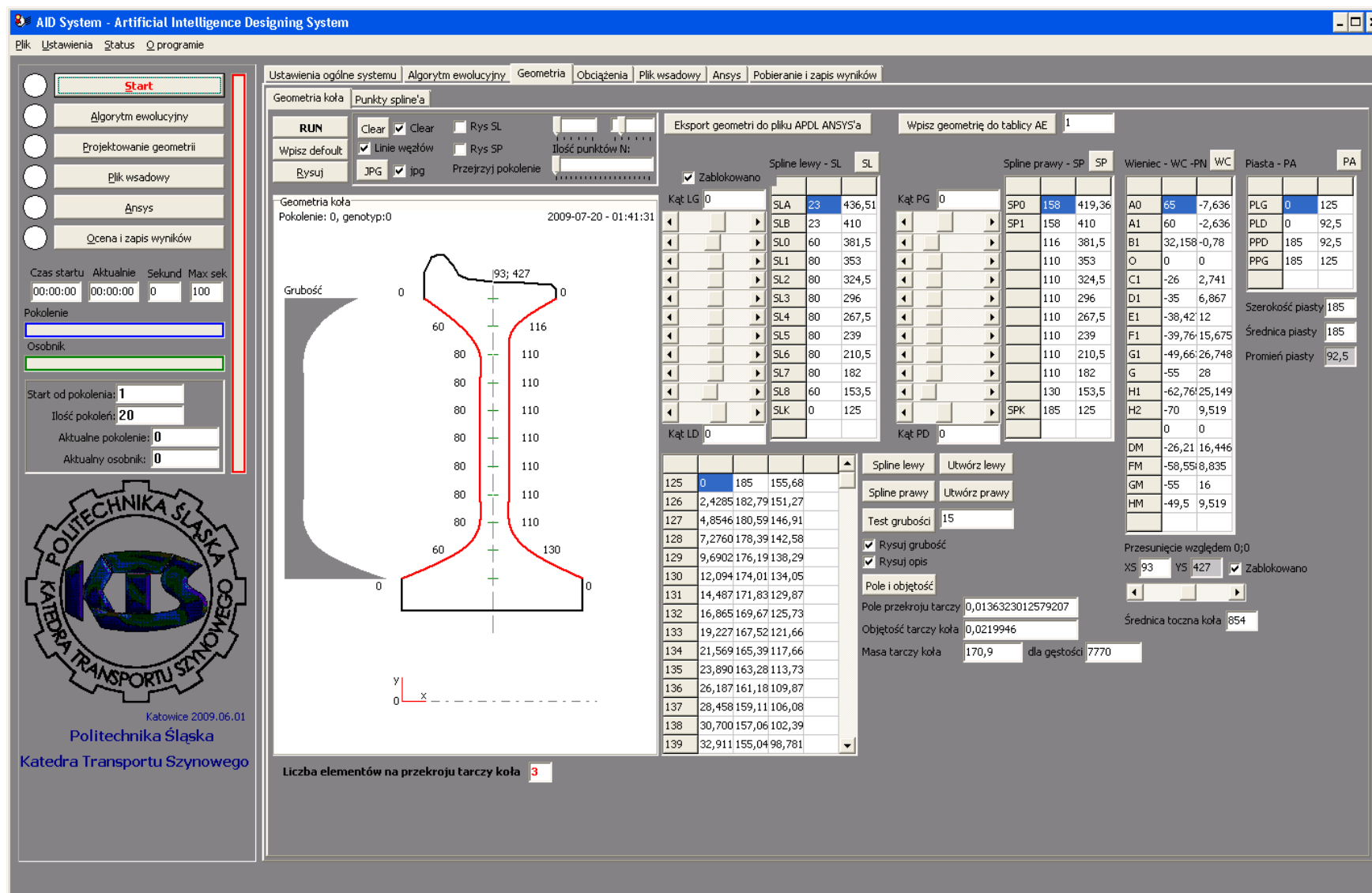
W branży kolejowej, układem, który jest szczególnie narażony na różnego rodzaju obciążenia mechaniczne i termiczne, którego trwałość i niezawodność warunkują bezpieczeństwo w transporcie szynowym, jest układ koło kolejowe – klocek hamulcowy. Dlatego też w pierwszej kolejności podjęto się opracowania systemu do projektowania i optymalizacji monoblokowych kół kolejowych. Najistotniejszym elementem poprzedzającym etap automatycznego projektowania i optymalizacji konstrukcji jest dokładna analiza panujących w badanym układzie obciążeń mechanicznych i termicznych. Możliwie dokładne określenie udziału procentowego strumienia ciepła generowanego podczas hamowania oraz określenie rozkładu prędkości strumienia powietrza, a później rozkładu współczynnika konwekcji, warunkując możliwość uzyskania poprawnych wyników modelowania. Jednocześnie należy zaznaczyć, że przy analizie układu, w którym występują nowe typy materiałów (nawet nieznaczne modyfikacje składu i technologii wytwarzania) konieczne jest wyznaczenie ich własności mechanicznych i to nie tylko w temperaturze otoczenia, ale przede wszystkim w warunkach szczególnych obciążeń termicznych modelowanego układu [6].

2. ELEMENTY SKŁADOWE SYSTEMU

W celu przeprowadzenia optymalizacji konstrukcji koła kolejowego istniała potrzeba opracowania dwóch podstawowych elementów tego systemu. Pierwszy z nich to możliwość automatycznego projektowania, tj. generowania geometrii koła z uwzględnieniem ograniczeń normatywnych, dotyczących np. zarysu powierzchni tocznej koła czy średnicy i szerokości podpięcia. Drugi natomiast jest odpowiedzią na konieczność uzyskiwania miarodajnej oceny jakości zaproponowanej geometrii.



Rys. 1. Schemat działania pierwszej wersji systemu optymalizacji koła kolejowego
Fig. 1. Scheme of action first version of software for railway wheel optimization

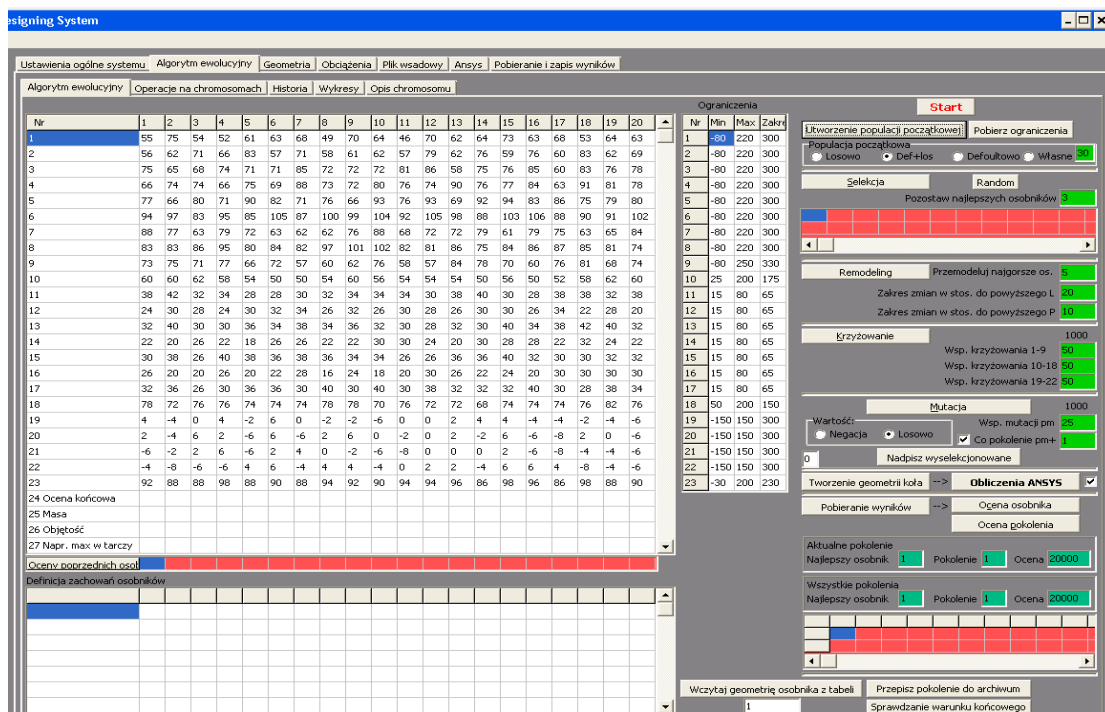


Rys. 2. Główne okno programu AIDsystem (wersja 3.1)

Fig. 2. Main view of AIDsystem (wersja 3.1) program

Do tego celu wykorzystano program ANSYS, który uruchamia się w trybie wsadowym. Moduł automatycznego generowania geometrii oraz pozostałe moduły wykonano poprzez opracowanie w języku Delphi, w systemie Delphi Code Gear, autorskiego programu komputerowego AIDsystem – rys. 1. Główną funkcją opracowanego systemu optymalizacji koła kolejowego jest przeprowadzenie wielu symulacji, pozwalających uzyskać w określonym czasie taką konstrukcję koła, która będzie się charakteryzowała możliwie najniższymi naprężeniami maksymalnymi wg hipotezy HMH (Hubera-Misesa-Hencky'ego), najniższą temperaturą maksymalną koła i tarczy hamulcowej, minimalnymi przemieszczeniami sumarycznymi z jednoczesną minimalizacją masy koła. Program modułu generowania geometrii w kolejnej wersji systemu optymalizacji zespółono z innymi modułami, tworząc jeden program o nazwie AIDsystem (Artificial Intelligent Designing System). Znacznie zmodyfikowano również algorytm ewolucyjny, dodając nowe możliwości funkcjonalne i zwiększając jego skuteczność. Przy opracowaniu systemu optymalizacji uwagę skupiono na szybkości realizacji pojedynczej sekwencji - od generowania geometrii do analizy numerycznej i oceny uzyskanych wyników. Takie rozwiązanie umożliwia przeprowadzenie znacznej liczby symulacji w relatywnie krótkim czasie pracy systemu. W tym celu przeprowadzono również analizę wrażliwości samego modelu MES kół kolejowych na liczbę koniecznych elementów skończonych na przekroju tarczy. Złożoność automatycznie tworzonej geometrii powodowała również konieczność opracowania takiej strategii automatycznego generowania siatki MES, która będzie umożliwiała dyskretyzację dowolnych konstrukcji koła.

Główne okno programu AIDsystem przedstawiono na rys. 2. Przedstawiona po lewej stronie paleta zawiera przyciski zapewniające realizację podstawowych funkcji systemu optymalizacji, tj. „Start” uruchamiający cały system, z możliwością wykonania przerwy pomiędzy kolejnymi symulacjami w momencie przyciśnięcia przycisku ESC, przycisk „Algorytm ewolucyjny”, „Projektowanie geometrii”, „Ansys” i „Ocena i zapis wyników”.



Rys. 3. Widok okna programu zawierającego elementy algorytmu ewolucyjnego, wraz z tablicą genotypów osobników aktualnego pokolenia

Fig. 3. View window that contains the elements of an evolutionary algorithm with an array of genotypes of individuals of the current generation

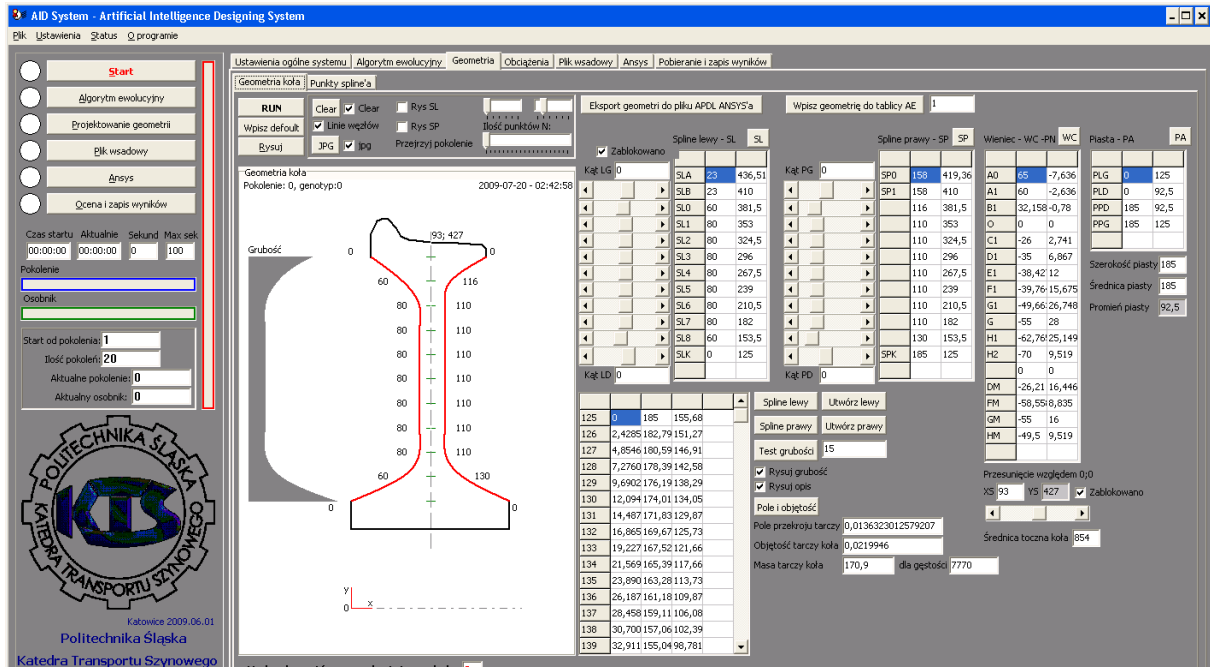
Poniżej tych przycisków znajdują się pola z informacją o aktualnie analizowanym

osobniku i numerze pokolenia, czasie startu analizy MES, wraz z czasem, który upłynął od uruchomienia programu ANSYS. W prawej części rysunku przedstawiono system zakładek, który pozwolił na umieszczenie i zgrupowanie wielu funkcji programu. Przedstawiona na rys. 2 zakładka programu zawiera wszystkie parametry algorytmu ewolucyjnego, od etapu utworzenia nowej populacji, poprzez selekcję, remodeling (dodatkowa funkcja do algorytmu ewolucyjnego), krzyżowanie i mutację, do modelowania geometrii, przesłania wygenerowanego modelu do programu ANSYS i oceny wyników. Wszystkie etapy algorytmu można prześledzić w trybie pracy ręcznej.

Na rys. 3 zaprezentowano natomiast tabelę ograniczeń, dzięki której możliwe jest generowanie geometrii koła w zdefiniowanym wcześniej zakresie.

Opracowany system ma możliwość archiwizowania genotypów wszystkich osobników w pokoleniach. Funkcja ta przydatna jest w przypadku chęci ponownego uruchomienia systemu od wybranego pokolenia. W takiej sytuacji pokolenie to będzie stanowiło pokolenie startowe i punkt uruchomienia dalszej optymalizacji zaczyna się od konstrukcji już wstępnie wyselekcjonowanej. W celu wizualizacji wyników aktualnych osobników pokolenia oraz wyników dotychczasowych pokoleń, w zakładce „wykresy” umieszczono pola wykresów.

Jednym z bardziej złożonych modułów systemu optymalizacji jest moduł automatycznego generowania geometrii koła kolejowego (rys. 4). Ze względu na konieczność umożliwienia nadawania dowolnej geometrii w obszarze tarczy koła kolejowego, geometrię tę modeluje się z wykorzystaniem krzywych sklepanych wyższego rzędu – „cubic spline”. Krzywą składaną, oddzielnie dla stron lewej i prawej przekroju koła, oznaczono kolorem czerwonym (rys. 4). Wbudowany algorytm interpolacji krzywymi sklepanymi wyższego rzędu (osobno dla stron lewej i prawej koła), w wybranych 11 punktach, pozwala nie tylko na przedstawienie wybranej geometrii koła, ale umożliwia również wstępną weryfikację grubości i pochylenia przekroju koła.



Rys. 4. Widok okna programu AIDsystem, z zakładką modułu do automatycznego generowania geometrii koła kolejowego

Fig. 4. View AIDsystem programs window with tab module to automatically generate the geometry of railway wheels

W celu wyznaczenia współrzędnych punktów łączących wybrane 11 punktów, należało interpolować te punkty krzywymi. Do interpolacji wybrano krzywe sklepane trzeciego rzędu.

Do wyznaczenia współczynników dla dziesięciu krzywych posłużono się metodą macierzową. Do rozwiązania układu dziesięciu równań z dziesięcioma niewiadomymi wykorzystano algorytm numeryczny rozwinięcia Laplace'a. Dla punktów końcowych krzywych wybrano warunek typu piątego, tj. podano wartość drugiej pochodnej krzywej w punkcie. W systemie zaimplementowano, w postaci numerycznej, sposób rozwiązywania interpolacji dla n punktów krzywymi trzeciego rzędu, wg równań zawartych w literaturze [8]. Poszczególne etapy i składniki obliczeń interpolacji splinów przedstawiono na rys. 5.

The screenshot shows the AID System interface with the following components:

- Left Panel:** Contains a 'Start' button, a list of menu items (Algorithm evolutionary, Geometric design, etc.), a timer, and a generation counter (Start od pokolenia: 1, Liczba pokoleni: 20).
- Top Panel:** Shows the current tab 'Geometria koła' and 'Punkty splina'.
- Main Window:** Displays a table for 'Wyznaczenie parametrów splina L' with columns: k, xk, yk, hk, mk, dk, uk, Sk,0, Sk,1, Sk,2, Sk,3, Delta, A, m1, m2, m3, m4, m5, m6, m7, m8, m9, z. The table contains 11 rows of data.
- Matrix Section:** Shows a 9x9 matrix for solving equations, with columns labeled 1 through 9. The matrix contains numerical values.
- Calculation Fields:** Includes 'Wyznaczenie x i y' (Wpisz x: 410, y: 158) and 'Wyznaczenie wyznacznika macierzy' (Przygotowanie: 0,267/-0,000; Przepisanie: 4,480387130400; Dołącz WB; Wyznacznik: 1,278441661).

Rys. 5. Widok okna programu AIDsystem z zakładką generowania krzywych typu spline i rozwiązywania układu równań „ n ” na „ n ”

Fig. 5. View AIDsystem programs window with tab module to generate spline curves and solving the system of equations „ n ” to „ n ”

W wyniku działania algorytmu interpolacji, przesunięcie któregośkolwiek suwaka lub wpisanie wartości do tabeli pokazanych na rys. 4 powoduje zmianę geometrii modelu. Geometrię podzielono na następujące części składowe: spline lewy tarczy, spline prawy tarczy, wieniec koła o współrzędnych według Polskiej Normy PN-EN 10862, z możliwością zmiany średnicy toczonej i przesunięcia względem piasty, oraz piasty o geometrii zgodnej z Normą. W system wbudowano również ograniczenia projektowe, które nie pozwalają na tworzenie geometrii niezgodnej z wymaganiami normatywnymi.

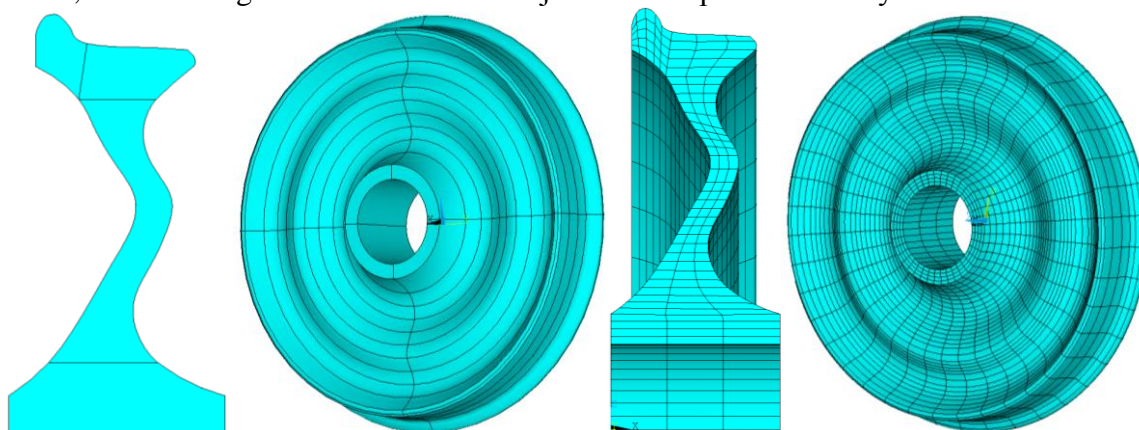
System optymalizacji automatycznie generuje kod i tworzy plik wsadowy w języku APDL do programu ANSYS. Możliwe jest ręczne ustawienie zakresu analizy czy ograniczenie działania algorytmu do dowolnego etapu, np. utworzenia samej geometrii, zadania obciążeń, obliczeń i odczytu uzyskanych rezultatów symulacji, z podziałem na zdefiniowane sekcje koła w tym dla tarczy, obręczy, wienca itp.

Proces optymalizacji konstrukcji przebiegał zgodnie z opisanym wcześniej algorytmem działań. Założono, że system optymalizacji będzie działał przez 500 pokoleń z 20 osobnikami w każdym pokoleniu, co daje 1000 tysięcy różnych konstrukcji kół kolejowych. Chromosom każdego osobnika to zapis parametrów konstrukcji koła kolejowego. Dla celów archiwizacji, do chromosomu o 23 parametrach dopisywanych jest 11 dodatkowych wielkości, stanowiących wyniki uzyskane z analizy MES. Dla każdego osobnika zapisywane są następujące pliki: model MES w postaci plików *.db, pliki wejściowe i wyjściowe, tj.: *.IN.

OUT i INF, log oraz wyniki analizy każdego osobnika, *.rst, full, esav, bcs, stat i bcs, wraz z obrazem geometrii utworzonego koła *.bmp. Dla jednego osobnika zajmuje to około 350 MB. Dodatkowo każde pokolenie archiwizowane jest w oddzielnych plikach z rozszerzeniem *.AIh, co umożliwia odtworzenie każdej geometrii i uzyskanych wyników analizy nawet bez plików programu ANSYS oraz daje możliwość późniejszej modyfikacji uzyskanych geometrii lub wpisania parametrów najlepszego osobnika czy pokolenia, jako pokolenia startowego do następnej optymalizacji.

W opracowywanym systemie optymalizacji położono nacisk na szybkość działania samego systemu oraz na optymalizację modelu MES. Pozwoliło to uzyskać średni czas obliczeń MES jednej konstrukcji na poziomie 4,6 sekundy dla procesora czterordzeniowego!

Wynikiem działania systemu optymalizacji jest nowa konstrukcja koła kolejowego wygenerowana automatycznie przez moduł sztucznej inteligencji na podstawie wyników ocen analizowanych konstrukcji, uzyskanych z programu ANSYS. Należy zaznaczyć, że nie można wykorzystać tu sformułowania „konstrukcja optymalna” ze względu na fakt, że zawsze możliwe jest dalsze prowadzenie systemu optymalizacji i uzyskanie chociażby niewielkich zmian uzyskanej wcześniej konstrukcji. Najlepsza konstrukcja wygenerowana została w 417 pokoleniu, dla czwartego osobnika. Konstrukcja ta została pokazana na rys. 6.



Rys. 6. Konstrukcja koła kolejowego wygenerowana, w wyniku działania systemu optymalizacji
Fig. 6. New construction of railway wheel generated as a result of the optimization system

Tabela 1

Wyniki obliczeń numerycznych kół kolejowych

Nazwa koła parametr oceny	UIC symetryczne	G000 417 U04	Różnica względna [%]
Temperatura maksymalna koła [°C]	379,7	347, 18	9,4%
Temperatura maksymalna tarczy [°C]	362,2	328, 0	10,4%
Masa tarczy [kg]	176,15	181, 15	-2,8%
Naprężenia zredukowane HMH tarczy koła [Pa]	$9,35 \cdot 10^8$	8,34 $\cdot 10^8$	12,1%
Przemieszczenia sumaryczne	$4,01 \cdot 10^{-3}$	3,00 $\cdot 10^{-3}$	34,7%
Ocena funkcji celu (poszukiwane minimum)	2893,00	2680 ,89	7,9%

3. WNIOSKI

Rozpatrując uzyskane wyniki z systemu optymalizacji, można stwierdzić, że w porównaniu z obecnym kołem symetrycznym UIC, zaproponowana nowa konstrukcja charakteryzuje się ponad 10% spadkiem temperatury maksymalnej tarczy, 12% spadkiem maksymalnych wartości naprężeń zredukowanych HMM w tarczy, 9,4% spadkiem temperatury maksymalnej koła i aż 34,7% spadkiem przemieszczeń sumarycznych, przy wzroście masy o 2,8%. Uzyskana geometria stanowi zatem rozwiązanie korzystniejsze z punktu widzenia eksploatacji kół kolejowych, ze względu na niższe temperatury maksymalne oraz naprężenia zredukowane. W ramach kontynuacji prac związanych z optymalizacją koła kolejowego otrzymana, na tym etapie konstrukcja będzie wykorzystana do dalszej optymalizacji, jako jeden z osobników pokolenia początkowego.

Należy pamiętać, że opracowany system jest w obecnej wersji dedykowany do projektowania i optymalizacji konstrukcji wyłącznie koła kolejowego. Można mieć jednak nadzieję, że rozwiązanie to będzie stanowić podstawę do dalszych prac w tym obiecującym kierunku rozwoju technik projektowania i optymalizacji konstrukcji, co w istotny sposób może przyczynić się do powstawania konstrukcji pozwalających na zwiększenie trwałości i niezawodności elementów oraz pojazdów szynowych.

Bibliografia

1. Zagrajek T., Krzesiński G., Marek P.: Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji. Ćwiczenia z zastosowaniem systemu ANSYS. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
2. Sitarz M., Mańka A.: Railway brake shoe. Research, designing and using. *Transportation Review*, No. 9, wydanie specjalne Przeglądu Komunikacyjnego, 2006, p. 51-59.
3. Mańka A.: Artificial intelligence using for control and optimization vehicle motion. II Międzynarodowa Konferencja „Transport System Telematics TST'02”, Ustroń 2002.
4. Mańka A.: Obliczenia wytrzymałościowe kompozytowych klocków hamulcowych z wykorzystaniem MES. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, s. Transport, z. 48, Gliwice 2003, s. 229-238.
5. Zdanowicz R., Mańka A.: Sztuczna inteligencja w symulacji i sterowaniu jednostkami mobilnymi. *Pomiary Automatyka i Robotyka*, Vol. 12, 2002, s. 9-25.
6. Sitarz M., Chrużik K., Mańka A.: Influence of mechanical properties of ER7 steel on the stress distribution in monoblok Wheel (braking taken into account). 15th International Wheelset Congress, Praga 2007,
7. Chrużik K.: Numeryczno-eksperymentalna analiza wytrzymałościowa kół zestawów kolejowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2005.
8. John H. Mathews, Kurtis K. Fink: *Numerical Methods Using Matlab*, Lebanon, Indiana, U.S.A.: Prentice Hall 2003.