

BADANIE WŁASNOŚCI AERODYNAMICZNYCH SPOJLERA SAMOCHODU SPORTOWEGO Z WYKORZYSTANIEM METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

ANDRZEJ GOŁAŚ¹, MICHAŁ RYŚ¹, TOMASZ KUCZERA²

¹Katedra Systemów Energetycznych i Urzędzeń Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

²Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

e-mail: ghgolas@cyf-kr.edu.pl, mrys@agh.edu.pl, tkuczera@gmail.com

Streszczenie. Obiektem badań był tylny spojler o kształcie symetrycznym stosowany w samochodach sportowych. Celem pracy było zbudowanie modelu matematycznego i zbadanie jego własności aerodynamicznych na drodze symulacji komputerowej z zastosowaniem metody elementów skończonych. W pracy zbadano również profil niesymetryczny spojlera, a także wpływ wirów krawędziowych na własności aerodynamiczne. Do obliczeń wykorzystano pakiet ANSYS CFX, natomiast do budowy modelu geometrycznego użyto pakietu Autodesk Inventor.

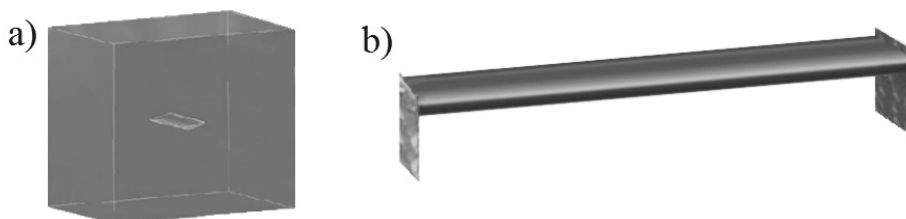
1. WSTĘP

Analiza ilościowa w badaniach aerodynamiki pojazdów drogowych wymaga przeprowadzenia doświadczeń w tunelu aerodynamicznym lub obliczeń numerycznych. Rozwój metod numerycznych i symulacji komputerowych pozwala na otrzymanie przybliżonych rozwiązań równań przepływów, często skomplikowanych i niemożliwych do rozwiązania analitycznego, dla obiektów o złożonych geometriach. Stają się one przydatnym narzędziem inżynierskim, pozwalającym na ograniczenie kosztów i czasu badań doświadczalnych, redukując liczbę tworzonych prototypów.

Celem pracy było zbudowanie modelu matematycznego opływu powietrza przez spojler samochodu sportowego oraz zbadanie własności aerodynamicznych, wyrażonych przez generowane siły nośną i oporu, w zależności od kształtu profilu spojlera i jego kąta natarcia. Zrealizowano to na drodze symulacji komputerowej z zastosowaniem metody elementów skończonych (MES).

2. OPIS OBIEKTU BADAŃ

Obiektem badań jest model bryły powietrza (rys. 1a), w którym znajduje się tylny spojler samochodu sportowego (rys. 1b). W pracy rozpatrzono dwa podstawowe kształty przekroju poprzecznego spojlera: symetryczny i niesymetryczny. W programie Autodesk Inventor Professional 11 zostały wykonane płaskie modele geometryczne spojlerów, które w następnym etapie zostały wyciągnięte na długość 1 [m].



Rys.1. Model geometryczny CAD obiektu badań: a) bryły powietrza przepływającego wokół spojlera, b) spojlera tylnego samochodu sportowego [2]

Wokół tak utworzonej bryły wygenerowano prostopadłościan o wymiarach 2.5x2x3 [m], wystarczających, aby obszar przepływu wokół spojlera nie był zakłócony. Zbudowane modele zaimportowano do programu ANSYS CFX.

3. OPIS FIZYKI ZJAWISKA

Zjawiska przepływu płynów są zazwyczaj skomplikowane. W celu wyznaczenia rozkładu prędkości i ciśnienia w płynie, konieczny jest opis matematyczny badanego zjawiska fizycznego. W pracy przyjęto następujące założenia i uproszczenia [5]:

- przyjęto prostokątny układ współrzędnych x, y, z ,
- płyn jest nieściśliwy, więc: $\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$
- płyn jest Newtonowski, zatem własności między innymi takie jak gęstość, lepkość są stałe,
- nie występują reakcje chemiczne ani przemiany fazowe,
- pominięto wpływ sił grawitacji.

Dla tak przyjętych założeń równaniami opisującymi ruch płynu są:

→ równania Naviera-Stokesa:

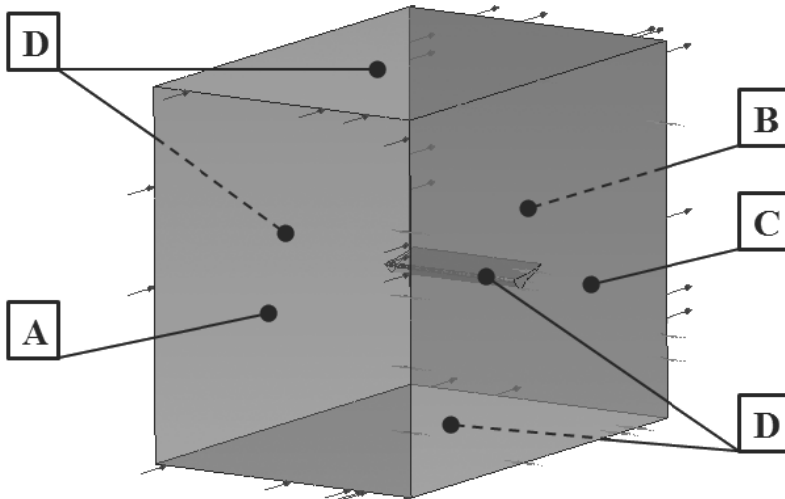
$$\begin{cases} \rho \cdot \left(v_x \cdot \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \\ \rho \cdot \left(v_x \cdot \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \\ \rho \cdot \left(v_x \cdot \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

→ równanie ciągłości przepływu:

$$\frac{\partial(\rho \cdot v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot v_z)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

gdzie:

- v_x, v_y, v_z – składowe wektora prędkości przepływu [m/s],
- ρ – gęstość [kg/m^3],
- μ – lepkość dynamiczna [$\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$].



Rys.2. Model obliczeniowy z zaznaczonymi powierzchniami do warunków brzegowych

W celu otrzymania rozwiązania przyjęto następujące warunki brzegowe i początkowe na powierzchniach (rys.2):

- **A:** wlot – warunek Dirichleta: prędkość przepływu powietrza jest równa $v_{xA} = 30$ [m/s], $v_{yA} = 0$ [m/s], $v_{zA} = 0$ [m/s],
- **B:** wylot – warunek Neumanna: ciśnienie statyczne $p_B = 0$ [Pa] oraz spełnienie zasady zachowania masy wymaga, by nie następowała zmiana żadnej składowej prędkości w kierunku normalnym do płaszczyzny wylotowej, tj.:

$$\frac{\partial v_{xB}}{\partial n} + \frac{\partial v_{yB}}{\partial n} + \frac{\partial v_{zB}}{\partial n} = 0 \quad (3)$$

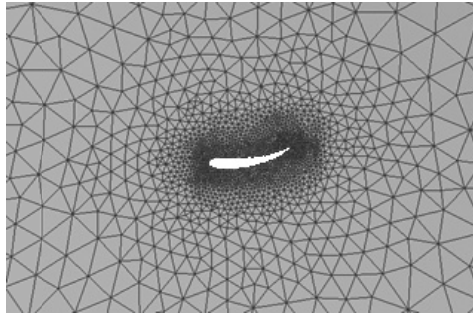
- **C:** powierzchnia symetrii – z uwagi na symetrię badanego zjawiska podzielono domenę obliczeniową na dwie części i przeprowadzono obliczenia dla jednej z nich,
- **D:** ściany boczne – warunek Dirichleta: nieruchome ściany o zaniedbywalnej chropowatości, prędkość przepływu powietrza wynosi $v_{xD} = v_{yD} = v_{zD} = 0$ [m/s].

Przyjęto także następujące wartości poszczególnych wielkości fizycznych: temperatura odniesienia $T_o = 25$ [°C], gęstość $\rho = 1.185$ [kg/m³], lepkość $\mu = 1.83 \cdot 10^{-5}$ [kg/(m·s)], ciśnienie odniesienia $p_o = 1$ [atm], liczba Reynoldsa $Re = 4.78 \cdot 10^5$.

W wyścigach samochodów sportowych dąży się do tego, aby spojlerzy pracowały w jak najmniej zaburzonym przepływie powietrza, dlatego też często tylne spojlerzy umieszcza się ponad linią dachu samochodu [4]. Z tego powodu przyjęto przepływ powietrza na niskim poziomie turbulencji: 5 [%], model k-epsilon.

4. PRZYGOTOWANIE MODELU OBLICZENIOWEGO

Po wczytaniu modelu do modułu CFX programu ANSYS 11, przystąpiono do podziału domeny obliczeniowej na siatkę elementów skończonych.

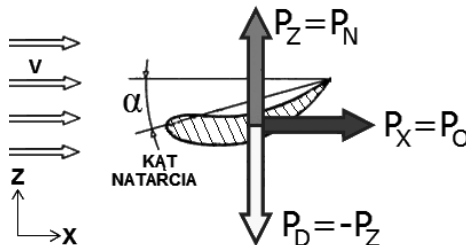


Rys.3. Fragment modelu dyskretnego - zagęszczenie siatki elementów skończonych wokół profilu spojlera

Ze względu na znaczne wymiary sekcji pomiarowej, w porównaniu do wielkości modelu, konieczne było zróżnicowanie wielkości elementów. W obszarze, który wymagał najwierniejszego odwzorowania, tj. samego kształtu spojlera i jego bliskiego sąsiedztwa o promieniu 15 [cm], siatka została zagęszczona (rys. 3). W wyniku podziału domeny obliczeniowej na elementy skończone otrzymano ok. 1 505 000 elementów skończonych oraz ok. 265 000 węzłów.

5. OBLICZENIA NUMERYCZNE I ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW

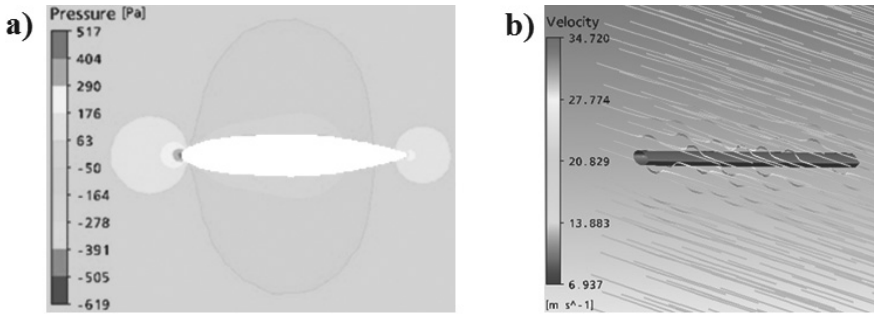
Konsekwencją analizy zagadnienia w programie ANSYS CFX jest otrzymanie rozkładu pola prędkości i ciśnienia powietrza. Pozwala to na wyznaczenie wartości generowanej siły nośnej P_N , siły docisku P_D i oporu P_O dla każdego kształtu spojlera przy różnych kątach natarcia (rys. 4) [4].



Rys.4. Schemat i oznaczenia sił działających na spojler

W przypadku spojlerów samochodów sportowych składowa pionowa siły aerodynamicznej jest skierowana w dół (zgodnie z rys. 4), dlatego określana jest ona jako siła docisku.

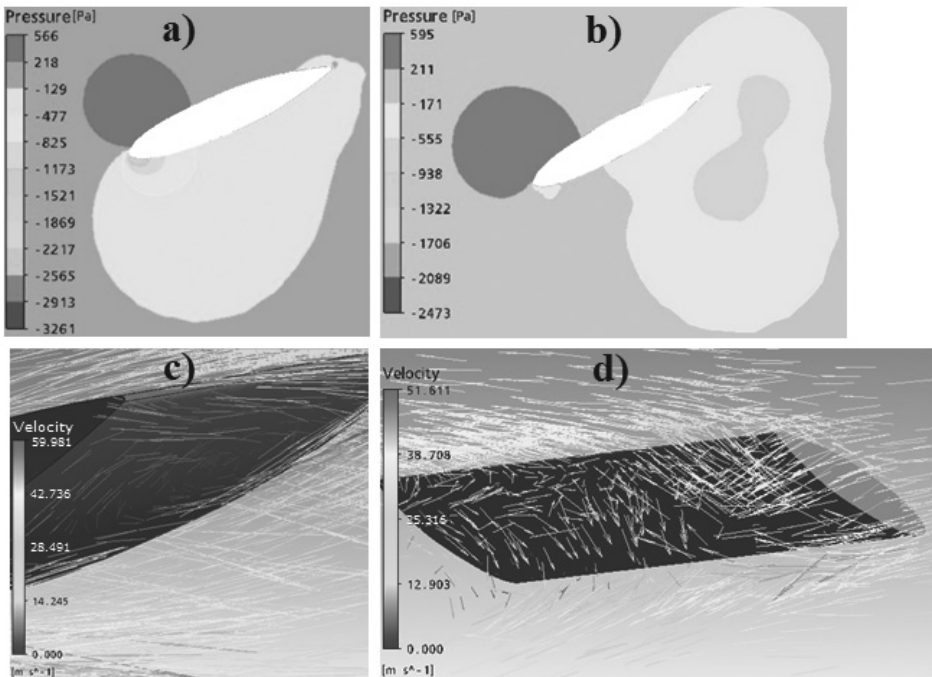
Przykładowe wyniki analizy numerycznej dla spojlera o profilu symetrycznym o kącie natarcia 0° , stanowiące rozkłady poszczególnych wielkości fizycznych, pokazano na rys. 5. Przedstawiono tam rozkład ciśnienia względnego w płaszczyźnie przekroju poprzecznego dla spojlera (płaszczyzna x-z – zgodnie z rys. 4), gdzie wartości ciśnień oznaczono kolorem (rys. 5a). Pokazano również linie prądu powietrza opływającego badany obiekt, gdzie wartości prędkości w poszczególnych punktach na liniach prądu oznaczono kolorem (rys. 5b).



Rys.5. Wyniki obliczeń numerycznych: a) rozkład ciśnienia względnego w płaszczyźnie przekroju x-z [Pa], b) linie prądu powietrza, gdzie kolorem zaznaczono wartości prędkości [m/s]

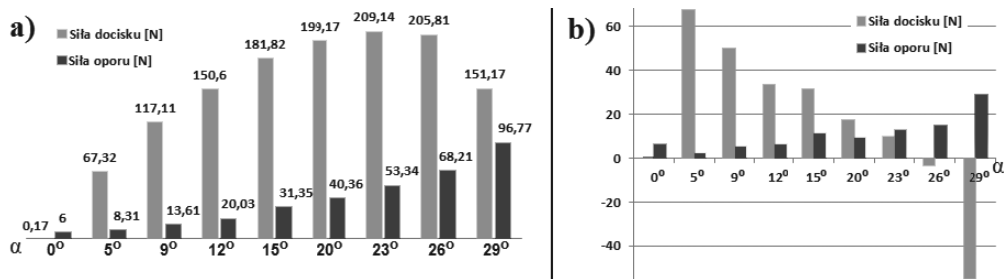
5.1. Spojler o profilu symetrycznym

Przeprowadzono symulację od zerowego kąta natarcia do krytycznego, to znaczy takiego, przy którym występuje zjawisko oderwania przepływu strugi powietrza. Ma to na celu przedstawienie wpływu tego kąta na wartość generowanej siły docisku i oporu.



Rys.6. Rozkład ciśnienia względnego dla kątów α a) 23°, b) 29°; rozkład wektorowy prędkości powietrza dla kątów α c) 23°, d) 29°

Dla kąta natarcia 23° w końcowej części profilu wystąpiło zjawisko oderwania warstwy przyściennej, czego konsekwencją jest znaczny przyrost siły oporu (rys. 6a, 6b). Obliczenia zakończono dla kąta $\alpha = 29^\circ$ (rys. 6c, 6d), gdzie doszło do oderwania na całej spodniej części spojlera, co wiąże się ze znacznym spadkiem siły docisku oraz ze wzrostem siły oporu.

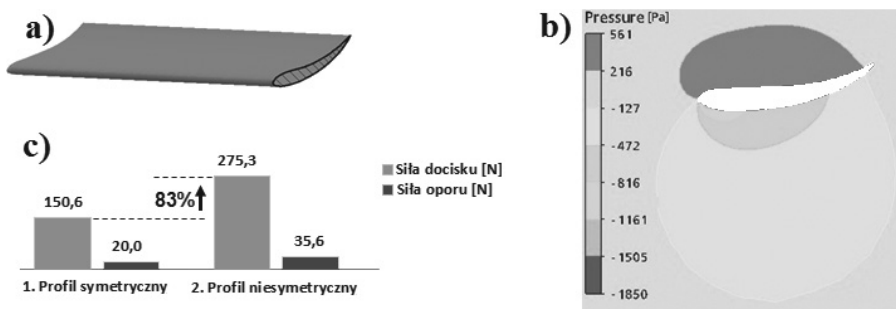


Rys. 7. a) generowana siła docisku i siła oporu w zależności od kąta natarcia, b) przyrost siły docisku i oporu od kąta natarcia

Tylny spojler samochodu sportowego ma za zadanie wytworzenie możliwie największej siły docisku przy jak najmniejszym oporze. Przeprowadzone badania symulacyjne pozwoliły określić kąt natarcia, przy którym następuje znaczny wzrost siły docisku przy jak najmniejszym wzroście oporu - jest kąt natarcia między 20° a 23° gdzie obie siły miały taki sam przyrost (rys. 7b).

5.2. Spojler o profilu niesymetrycznym

Przeprowadzono analizę tylko dla kąta natarcia 12°, ze względu na bardziej złożoną geometrię i czas obliczeń (rys. 8a).

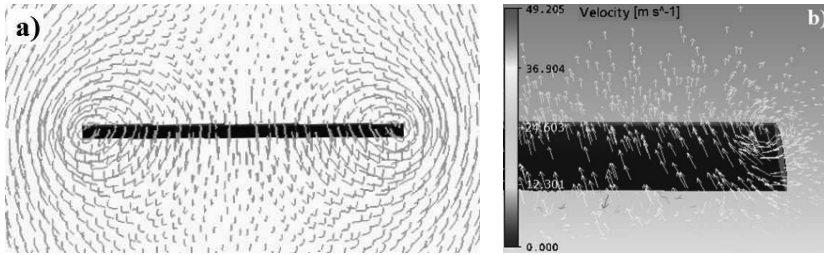


Rys. 8. a) model spojlera o profilu niesymetrycznym, b) rozkład ciśnienia względnego, c) zestawienie wartości generowanych sił

Wyniki analizy numerycznej (rys. 8b) pozwalają na ocenę i porównanie badanego kształtu ze spojlerem symetrycznym przy tym samym kącie natarcia. Profil ten ma lepsze własności aerodynamiczne (rys. 8c). Wyniki te świadczą o kluczowej roli kształtu geometrycznego profilu spojlera.

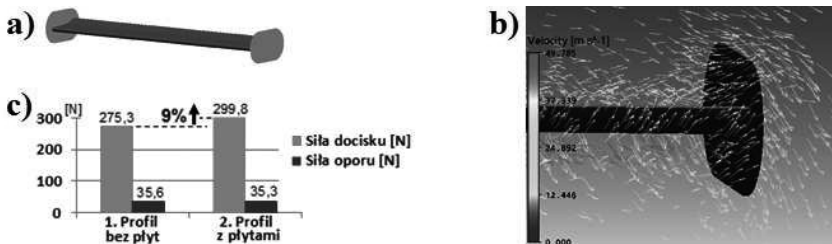
5.3. Wpływ wirów krawędziowych na własności aerodynamiczne

Przepływ powietrza przed spojlerem jest niezaburzony, jednak za nim występują bardzo silne zawirowania (rys. 9a), które wpływają na obniżenie siły docisku i zwiększają siłę oporu ruchu. Zawirowania te powstają na bocznych krawędziach spojlera i noszą nazwę wirów krawędziowych (rys. 9b).



Rys.9. Wiry krawędziowe: a) linie prądu powietrza za spojlerem, b) rozkład wektorowy prędkości powietrza

Użycie płyt krawędziowych ustabilizowało lokalnie przepływ powietrza wokół spojlera, polepszając przy tym własności aerodynamiczne (rys. 10).

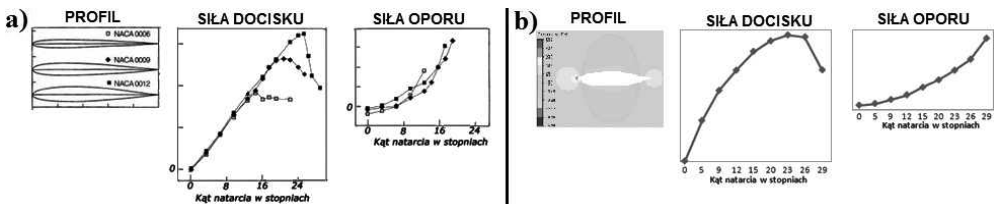


Rys.10. a) model spojlera z płytami krawędziowymi, b) rozkład wektorowy prędkości, c) zestawienie wartości generowanych sił

Takie rozwiązanie jednak nie zapobiega powstawaniu wirów krawędziowych, które nadal tworzą się obszary za płytami krawędziowymi.

5.4. Weryfikacja obliczeń numerycznych

W niniejszej pracy przedstawiono wyłącznie wyniki numerycznej symulacji opływu powietrza przez spojler.



Rys.11. Charakterystyki aerodynamiczne dla a) profili symetrycznych zbadanych doświadczalnie [2], b) profilu symetrycznego użytego w pracy

W celu weryfikacji doświadczalnej należałoby przeprowadzić eksperyment w tunelu aerodynamicznym, co może być celem dalszego etapu badań. Porównano otrzymane wyniki numeryczne dla modelu symetrycznego z danymi zaczerpniętymi z badań doświadczalnych modelu fizycznego – przy założonych uproszczeniach są one satysfakcjonujące (rys. 11).

6. PODSUMOWANIE

Dla tylnych spojlerów samochodów sportowych bardzo istotne są wartości sił docisku i oporu. Jak wiadomo, ma on za zadanie wytworzenie możliwie największej siły docisku przy jak najmniejszym oporze aerodynamicznym, co wywiera znaczący wpływ na osiągi pojazdu, w szczególności istotne są maksymalne przyspieszenie oraz prędkość. Opracowany model numeryczny przepływu powietrza opływającego spojler pozwala na przeprowadzanie badań symulacyjnych, które mogą być przydatne zarówno podczas doboru odpowiedniej geometrii spojlera, kąta natarcia, jak i późniejszych badań nad modyfikacją własności aerodynamicznych przez wprowadzanie zmian w jego strukturze. Stanowi to więc użyteczne narzędzie przy projektowaniu i optymalizacji konstrukcji. Otrzymane wyniki należy zweryfikować na drodze eksperymentu w tunelu aerodynamicznym. W dalszych pracach można rozważyć badania nad własnościami aerodynamicznymi tylnych spojlerów umiejscowionych poniżej linii dachu samochodu sportowego, uwzględniające wpływ bryły pojazdu na zaburzenia przepływu powietrza.

LITERATURA

1. ANSYS Inc.: ANSYS 11 documentation, 2008.
2. Katz J.: Race car aerodynamics – designing for speed. Robert Bentley Automotive Publishers, 1995.
3. Koike M., Nagayoshi T., Hamamoto M.: Research on aerodynamic drag reduction by vortex generators. “Mitsubishi Motors Technical Review” 2004, No. 16, p. 11-16.
4. Piechna J.: Podstawy aerodynamiki pojazdów. Warszawa: WKiŁ, 2000.
5. Tu J., Heng Yeoh G., Liu. C.: Computational fluid dynamics a practical approach. Oxford: Elsevier, 2008.
6. Zagrajek T., Krzesiński G., Marek P.: Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji. Warszawa: Ofic. Wyd. Pol. Warsz., 2006.

INVESTIGATION OF AERODYNAMICAL PROPERTIES OF SPORTS CAR SPOILER USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Summary. The object of investigations in the work was symmetrical shaped rear spoiler using in sports cars. The aim of this study was to build a mathematical model and examine its aerodynamical properties in the way of computer simulation using finite element method. The study also examined an asymmetric profile of spoiler and the influence of trailing vortices on the aerodynamic. To solve this problem was used the ANSYS CFX software and to build the geometrical model was used the Autodesk Inventor software.