

OCENA EFEKTYWNOŚCI WYBRANYCH ROZWIĄZAŃ SKRZYŻOWAŃ WIELOPASMOWYCH TYPU RONDO

Artykuł dotyczy problematyki rond jednopasmowych, dwupasmowych oraz turbinowych. W artykule porównano przepustowości dla opcji ronda dwupasmowego oraz turbinowego. Do analizy wybrane zostało rondo dwupasmowe w mieście Rzeszów, które stanowiło podstawę do zamodelowania ronda turbinowego. Zamodelowanie i skalibrowanie analizowanych opcji odbyło się przy pomocy programu do mikrosymulacji ruchu drogowego Vissim. Wyniki badania pokazują, że dla analizowanego przypadku rondo turbinowe cechuje się zwiększoną przepustowością, co przekłada się na zmniejszenie kongestii oraz opóźnień ruchu.

WSTĘP

Obiekty drogowe typu rondo są użytecznymi narzędziami do uspokojenia ruchu drogowego na skrzyżowaniach, jednak posiadają również ograniczoną zdolność przepustowości potoku pojazdów. W ostatnich latach badania w zakresie stosowalności rond skupione były na projektowaniu nowych typów ich rozwiązań. Skrzyżowanie typu rondo o jednym pasie ruchu przeobrażone zostało w rondo dwupasmowe o większej przepustowości, natomiast kolejno w rondo turbinowe. Ronda turbinowe odniosły duży sukces i są powszechnie stosowane w wielu krajach Unii Europejskiej. Cechują się one większą przepustowością w porównaniu do rond konwencjonalnych [2].

Artykuł ten przedstawia porównanie efektywności rozwiązań skrzyżowania typu rondo konwencjonalne z dwoma pasami ruchu oraz typu turbinowego. Jako przykład skrzyżowania posłużyło rondo zlokalizowane na przecięciu ulic Warszawskiej, Marszałkowskiej, Ryckerskiej oraz Lubelskiej w mieście Rzeszów. Obecnie funkcjonuje tam rondo dwupasmowe, natomiast opcja zastosowania ronda turbinowego zamodelowana zostanie w programie do mikrosymulacji ruchu Vissim. Celem badania jest zamodelowanie i skalibrowanie modelu symulacyjnego aktualnego rozwiązania, jak również minimalizacja opóźnień ruchu oraz poprawa przepustowości skrzyżowania poprzez zamodelowanie i zastosowanie opcji alternatywnej ronda turbinowego.

1. CHARAKTERYSTYKA SKRZYŻOWAŃ TYPU RONDO

Tradycyjne rondo jest to skrzyżowanie dróg bez sygnalizacji świetlnej, na którym ruch odbywa się wokół centralnej wyspy [17]. W porównaniu do innych rozwiązań skrzyżowań, rondo jest bardziej wydajne pod kątem realizowania wielu funkcji jednocześnie, np. regulacji oraz uspokojenia ruchu drogowego. Ronda są szczególnie popularne ze względu na możliwość zwiększania płynności ruchu wraz z jednoczesną poprawą jego bezpieczeństwa [14]. Jednak błędy w podejmowaniu decyzji oraz niezrozumienie przepisów ruchu drogowego przez kierowców prowadzą do pojawiania się kolizji kierunków ruchu na okrężnych pasach rond. Zdarzenia te mimo tego, że nie są poważne w skutkach, niestety są częste i wpływają negatywnie na płynność ruchu.

1.1. Rondo jednopasmowe

Najbardziej podstawową formą skrzyżowania typu rondo jest jego jednopasmowa wersja. Ronda jednopasmowe zapewniają wyższy niż na innych typach skrzyżowań poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego [10, 11, 16]. Spowodowany jest on m.in. poprzez [6, 7, 8, 12, 13]:

- zredukowaną liczbę punktów kolizyjnych,
- małe prędkości przejazdu przez skrzyżowanie (15-30 km/h),
- mniejsze straty czasu przejazdu w porównaniu do klasycznych skrzyżowań,
- oddzielenie strumieni ruchu na wlotach od strumieni na wylotach (piesi mają możliwość przechodzenia wlotu i wylotu oddzielnie).

Głównym ograniczeniem stosowania rond jednopasmowych jest ich przepustowość. Szacuje się, że ronda tego typu są w stanie obsłużyć od 2000 do 2500 pojazdów w ciągu godziny [2].

1.2. Rondo dwupasmowe

Ronda dwupasmowe często używane są dla skrzyżowań, na których popyt ruchu jest tak duży, że rondo jednopasmowe nie byłoby w stanie go obsłużyć. Mimo tego, że ronda dwupasmowe mają dobry poziom wydajności obsługi ruchu, doświadczenie zebrane przez ostatnie lata pokazuje, że sprawiają one również pewne funkcjonalne problemy [9]. Na dużych rondach dwupasmowych większe odległości pomiędzy wlotami powodują, że kierowcy jadący po nich z wyższymi prędkościami, w przypadku manewru zmiany pasa ruchu z pasa wewnętrznego na zewnętrzny (opuszczając rondo), stwarzają potencjalne niebezpieczeństwo. Wynika ono z przeplatania się potoków ruchu, co generuje dodatkowe punkty kolizji, powodując spadek bezpieczeństwa skrzyżowania.

1.3. Rondo turbinowe

W 1996 r. Bertus Fortuijn zaprojektował nowy typ ronda wielopasmowego – rondo turbinowe. Rondo to cechuje się większą przepustowością niż klasyczne rondo dwupasmowe, jednocześnie zachowując poziom bezpieczeństwa podobny jak na rondzie jednopasmowym [2].

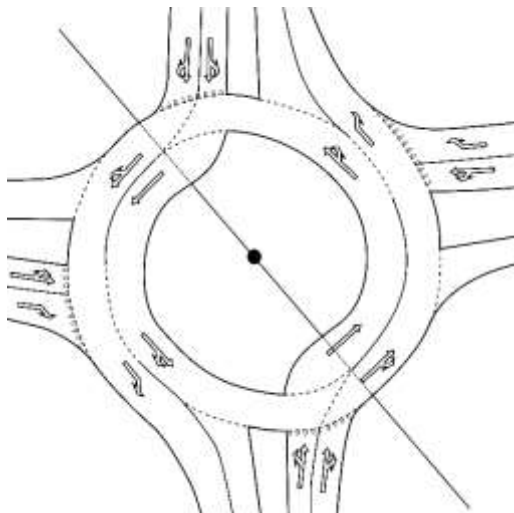
Rondo turbinowe to wielopasmowe rondo ze spiralnym oznakowaniem tarczy ronda oraz z wydzielonymi dla niektórych relacji pasami ruchu [5]. Cechuje się ono uprzywilejowaniem wybranego kierunku ruchu. Na wlotach rond turbinowych kierowcy zmuszeni są do wyboru pożądanego kierunku jazdy. Zmiana kierunku jazdy na tarczy

ronda jest niemożliwa, ponieważ potoki ruchu dla pasa zewnętrznego i wewnętrznego nie przecinają się.

Cechy charakterystyczne ronda turbinowego to m.in. [5]:

- występowanie nie więcej niż dwóch pasów ruchu na obwodni ronda w obszarze przy wlotach,
- w przypadku braku poszerzenia pierścienia niemożliwość zawracania na jednym z kierunków ruchu,
- brak możliwości manewrów przecinania się strumieni pojazdów w obszarze tarczy ronda, dzięki wykorzystaniu spiralnego oznakowania poziomego wraz ze spiralnym ukształtowaniem tarczy ronda (redukcja liczby punktów kolizji),
- występowanie na tarczy ronda więcej niż jednego pasa ruchu,
- relatywnie niska prędkość przejazdu przez rondo, wynikająca z separatorów ruchu oraz specyficznej geometrii ronda,
- możliwość osiągnięcia wyższej przepustowości w porównaniu do ronda dwupasmowego,
- możliwość wyboru kierunku jazdy tylko na wlocie do ronda.

Jednak należy zaznaczyć, że z przyczyn technicznych (m.in. problem odśnieżania, odprowadzania wód opadowych, udziału ruchu pojazdów ciężkich), jak i społecznych (m.in. problem braku akceptacji nowych rozwiązań drogowych przez społeczeństwo), na części funkcjonujących na terenie kraju rond turbinowych nie zainstalowano wyniesionych ponad powierzchnię jezdni trwałych separatorów ruchu [5]. Na rys. 1 przedstawiono przykładowy schemat ronda turbinowego.



Rys. 1. Schemat czterowlotowego ronda turbinowego

2. METODYKA BADAŃ

Jako przykład do analizy posłużyło funkcjonujące na terenie Rzeszowa rondo dwupasmowe znajdujące się na przecięciu ulic Warszawskiej, Marszałkowskiej, Rycerskiej oraz Lubelskiej. Rondo to posiada cztery główne wloty, z których trzy są wlotami z dwoma pasami ruchu. Wloty od strony ulic Warszawskiej, Lubelskiej oraz Marszałkowskiej cechują się wysokim natężeniem ruchu, natomiast wlot od ulicy Rycerskiej niskim. Popyt ruchu na drogach wlotowych dwupasmowych w godzinach dojazdu i wyjazdu z miejsc pracy powoduje blokowanie się dróg dojazdowych do skrzyżowania na długości ok. 100 m od wjazdu na rondo. Widok skrzyżowania przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Widok badanego skrzyżowania

Do kalibracji oraz analizy wydajności i efektywności skrzyżowań potrzebne były następujące dane:

- geometria skrzyżowania,
- natężenie ruchu drogowego,
- przepustowość skrzyżowania,
- opóźnienie ruchu na skrzyżowaniu.

Podczas pomiarów ruch pieszych był bardzo mały, dlatego też pominięto go w dalszej analizie porównań skrzyżowań. Wszystkie dane drogowe zostały mierzone w dniu 18.12.2015 r. w godzinie porannego wzmożonego ruchu od 8:00 do 9:00.

Dane geometrii skrzyżowania pobrane zostały na podstawie zdjęcia satelitarnego dostępnego w serwisie Google Maps. Zdjęcie zostało odpowiednio wyskalowane do pracy w programie do mikrosymulacji ruchu Vissim. Liczba natężenia ruchu drogowego z poszczególnych wlotów na rondo została uzyskana przy pomocy danych z bazy systemu preselekcyjnego ważenia pojazdów.

Do pomiaru przepustowości skrzyżowania potrzebna jest kolejka pojazdów utrzymująca się przynajmniej przez jedną godzinę, dlatego też pomiar spełnia stawiane wymogi czasowe [15]. Opóźnienie ruchu mierzone było na podstawie średnich czasów przejazdów na skrzyżowaniu w okresie pomiaru.

2.1. Modelowanie skrzyżowań w programie do mikrosymulacji ruchu Vissim

Dla potrzeb badania w programie przyjęto:

- średnią prędkość przejazdu przez istniejące rondo dwupasmowe – 25 km/h,
- średnią prędkość przejazdu przez alternatywne rondo turbinowe – 30 km/h,
- czas trwania symulacji – 1h,
- zgodnie z pomiarem natężenia ruchu, następujące wartości: wlot od strony ul. Warszawskiej – 1507 pojazdów/h, ul. Marszałkowskiej – 1453 pojazdów/h, ul. Lubelskiej – 1000 pojazdów/h, ul. Rycerskiej – 100 pojazdów/h.

W celu uniknięcia losowości symulacji, każdy scenariusz powtórzono 10 razy, z czego wyliczono średnią wartość opóźnień ruchu oraz przepustowość skrzyżowania.

Zamodelowane warianty skrzyżowań typu rondo przedstawiono na rys. 3 i 4.



Rys.3. Obecnie funkcjonujące rondo zamodelowane w programie Vissim



Rys.4. Alternatywne rondo turbinowe zamodelowane w programie Vissim

Zamodelowane rondo turbinowe wprowadza modyfikację dla ul. Rycerskiej, mianowicie poszerza się jej wlot i wylot o dodatkowy pas ruchu. Głównym kierunkiem ruchu na tym rondzie jest odcinek od ul. Marszałkowskiej do ul. Lubelskiej z powodu największego sumarycznego natężenia ruchu.

Parametry dotyczące ustępowania pierwszeństwa ustawiono w programie zgodnie z danymi podanymi w tabeli 1.

Tab. 1. Dane do symulacji dotyczące pierwszeństwa przejazdu na badanych rondach

Typ ronda	ul. Lubelska/ul. Marszałkowska		ul. Warszawska/ul. Rycerska	
	Odstęp od pojazdów (m)	Odstęp czasowy reakcji (s)	Odstęp od pojazdów (m)	Odstęp czasowy reakcji (s)
Rondo dwupasmowe	3,5 (pas zewnętrzny)	2,7 (pas zewnętrzny)	2 (pas zewnętrzny)	2 (pas zewnętrzny)
	3,8 (pas wewnętrzny)	3,2 (pas wewnętrzny)	2,6 (pas wewnętrzny)	2,9 (pas zewnętrzny)
Rondo turbinowe	3,5	2,7	2 (pas zewnętrzny)	2 (pas zewnętrzny)
	-	-	2,6 (pas wewnętrzny)	2,9 (pas zewnętrzny)

Należy zaznaczyć, że pierwsze 5 minut trwania symulacji zostało wykluczone z analizy, z powodu braku wystarczającego nasycenia modelu. Symulacja startuje z zerową liczbą pojazdów, dlatego na początku potrzebna jest pewna faza napełnienia sieci drogowej. W przypadku nie wykonania tej fazy „rozgrzania” modelu, autentyczne dane drogowe nie pokrywałyby się z danymi uzyskiwanymi podczas symulacji [3].

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. Kalibracja modelu

Model został skalibrowany i sprawdzony względem parametru opóźnienia ruchu na skrzyżowaniu. Opóźnienie to badane było na wlocie od strony ul. Warszawskiej do wylotu na ul. Marszałkowską, ponieważ w godzinach porannych tworzą się tam największe kolejki.

Wyniki średnich opóźnień ruchu dla warunków rzeczywistych oraz symulacyjnych przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Wyniki opóźnienia ruchu dla badanego skrzyżowania

Próba symulacji	Opóźnienie ruchu (s)	
	Symulacja	Warunki rzeczywiste
1	168	152
2	153	114
3	115	120
4	125	-
5	147	-
6	102	-
7	159	-
8	157	-
9	114	-
10	126	-
Średnia	137	129

Poprzez jednoczynnikową analizę wariancji dla przedziału ufności 95% wyznaczono, że wartość- p (0,601) jest większa od poziomu istotności α (0,05). Dlatego też można założyć, że wartości zaobserwowane na drodze są bliskie wartościom symulacji.

Tab. 3. Wyniki jednoczynnikowej analizy wariancji dla danych opóźnienia ruchu

Źródło wariancji	SS	df	MS	F	Wartość- p	Test F
Pomiędzy grupami	145,24105	1	145,24102	0,2885374	0,60185	4,84433
W obrębie grup	5537,0666	11	503,36967	-	-	-
Razem	5682,3076	12	-	-	-	-

Rzeczywiste wartości natężenia ruchu dla poszczególnych wlotów badanego ronda, zestawione z wynikami modelu symulacyjnego po kalibracji, przedstawione zostały w tabeli 4.

Tab. 4. Wyniki współczynnika statystycznego GEH wg natężenia ruchu drogowego dla modelu symulacyjnego oraz rzeczywistego

Włot skrzyżowania	Model symulacyjny	Model rzeczywisty	GEH
	Natężenie ruchu (pojazdy/h)	Natężenie ruchu (pojazdy/h)	
ul. Warszawska	1384	1507	3,2
ul. Marszałkowska	1208	1453	6,7
ul. Rycerska	72	100	3,1
ul. Lubelska	810	1000	6,3

Dla zamodelowanego ronda przeprowadzony został test statystyczny GEH, którego zadaniem jest porównanie rzeczywistego natężenia ruchu drogowego z zasymulowanym. Jeżeli wynik współczynnika GEH jest mniejszy niż 5, to natężenie ruchu symulacji możemy rozpatrywać jako wiarygodne. Natomiast, jeżeli współczynnik ten jest w przedziale od 5 do 10, to powinno zastosować się dodatkowe kalibracje modelu. Powyżej wartości 10 stwierdza się, że występuje problem z modelem albo danymi [4]. Dla ul. Marszałkowskiej oraz Lubelskiej współczynnik GEH przekroczył wartość 5, która jest graniczną poprawnie działającego modelu. Jednak model ten kalibrowany był względem ruchu od ul. Warszawskiej, a współczynnik GEH dla niej wynosi 3,2, dlatego też model może być respektowany jako odpowiednio skalibrowany.

3.2. Ocena przepustowości zamodelowanych skrzyżowań

Po kalibracji modelu symulacyjnego ronda dwupasmowego przeprowadzona została jego ocena przepustowości metodą ICU (ang. Intersection Capacity Utilization method). Wyniki przedstawione zostały w tabeli 5.

Tab. 5. Wyniki oceny poziomu jakości (LOS, ang. Level of service) wg metody ICU dla badanego ronda dwupasmowego

Włot skrzyżowania	Przepustowość modelu (pojazdy/h)	Natężenie ruchu (pojazdy/h)	Natężenie /Przepustowość (%)	współczynnik ICU	Poziom usług LOS (Level of service)
ul. Warszawska	1402	1507	107%	108%	G
ul. Marszałkowska	1256	1453	116%		
ul. Rycerska	97	100	103%		
ul. Lubelska	917	1000	109%		

Wyznaczony poziom jakości LOS, określony za pomocą litery G wskazuje, że zamodelowane skrzyżowanie dwupasmowe jest wypełnione o 8% i może doświadczać w ciągu dnia kongestii, która sumarycznie może wynieść od 60 do 120 minut [1].

W związku z możliwością występowania dużych kolejek w ruchu na obecnie funkcjonującym skrzyżowaniu, w tabeli 7 przedstawiono wyniki przepustowości dla alternatywnego ronda turbinowego.

Tab. 6. Wyniki przeprowadzonego badania przepustowości dla opcji ronda dwupasmowego

Typ ronda	Włot skrzyżowania	Przepustowość modelu (pojazdy/h)	Sumaryczna przepustowość skrzyżowania (pojazdy/h)
Rondo dwupasmowe	ul. Warszawska	1402	3672
	ul. Marszałkowska	1256	
	ul. Rycerska	97	
	ul. Lubelska	917	

Tab. 7. Wyniki przeprowadzonego badania przepustowości dla opcji ronda turbinowego

Typ ronda	Włot skrzyżowania	Przepustowość modelu (pojazdy/h)	Sumaryczna przepustowość skrzyżowania (pojazdy/h)
Rondo turbinowe	ul. Warszawska	1603	4878
	ul. Marszałkowska	1701	
	ul. Rycerska	205	
	ul. Lubelska	1369	

PODSUMOWANIE

Efektywność, czyli sumaryczna przepustowość dla skrzyżowania ronda turbinowego jest znacząco zwiększona w porównaniu do aktualnie funkcjonującego ronda dwupasmowego. Dla ronda dwupasmowego (po weryfikacji w programie do mikrosymulacji ruchu) przepustowość wyniosła 3672 pojazdów/h, natomiast dla opcji turbinowej 4878 pojazdów/h, co stanowi zwiększenie o 33%.

Interesujące jest to, że mimo głównego kierunku przepływu ruchu dla ronda turbinowego, co w badanym przypadku stanowiły ulice Marszałkowska oraz Lubelska, zauważono również zwiększoną przepustowość dla kierunków mniej uprzywilejowanych na geometrii ronda od ulicy Warszawskiej oraz Rycerskiej. Spowodowane jest to tym, że wlot i wylot na rondo turbinowe od ul. Rycerskiej został poszerzony o dodatkowy pas ruchu oraz tym, że większość relacji skrajnych od tych ulic odbywa się w kierunku pierwszego zjazdu z ronda, co ułatwione jest poprzez bezkolizyjne wjazdy. Jeżeli większa część przejazdów od tych ulic byłaby w relacji na wprost, bądź w lewo, to przepustowość ta uległaby drastycznemu zmniejszeniu. Warunkuje to wydłużenie odległości od miejsca postoju przed wjazdem na skrzyżowanie a wewnętrznym pasem ronda, co przekłada się na zwiększenie odstępów pomiędzy samochodami i czasu potrzebnego na włączenie się do ruchu.

Różnica w wartościach przepustowości dla badanych opcji wynika z redukcji punktów przecięcia pasów ruchu oraz zmniejszenia zjawiska tzw. falowania przepływu pojazdów oraz chwilowych zatrzymań, co ma miejsce na rondzie dwupasmowym.

Zmieniona geometria skrzyżowania ronda turbinowego pokazuje, że wymagania przestrzenne są praktycznie takie same jak dla ronda dwupasmowego. Jednakże, z powodu specyficznych warunków drogowych, które cechują inne tego typu skrzyżowania, każdy przypadek ewentualnej aplikacji ronda turbinowego trzeba rozpatrywać indywidualnie.

BIBLIOGRAFIA

- Crommelin, R., *Employing intersection capacity utilization values to estimate overall level of service*, Transportation Research Board, 2010.
- Fortuijn, L., *Turbo Roundabouts: Design Principles and Safety Performance*, Transportation Research Record, 2009.
- Jaworski A., Lejda K., Mądziel M., *Analiza opóźnienia ruchu drogowego dla wybranych rozwiązań odnośnie pierwszeństwa przejazdu na skrzyżowaniu typu X*, Monografia pod redakcją naukową Kazimierza Lejdy, Rzeszów 2016.
- Kwakwa O., Adams C., *Assesment of turbo and multilane roundabout alternatives to improve capacity and delay at sigle lane roundabout using microsimulation model Vissim: a case study in Ghana*, American Journal of Civil Engineering and Architecture, Vol. 4, No. 4, Science and Educaton Publishing, 2016.

5. Macioszek E., *Stan bezpieczeństwa ruchu drogowego na rondach turbinowych w Polsce*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, z. 96, Warszawa 2013.
6. Macioszek E., *Analiza prędkości przejazdu pojazdów przez skrzyżowania z ruchem okrężnym*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport z. 82, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.
7. Macioszek E., *Stan wiedzy na temat prędkości przejazdu pojazdów przez skrzyżowanie typu rondo*, Logistyka 4, Poznań 2011.
8. Madani H., *Dynamic vehicular comparison between a police-controlled roundabout and a traffic signal*, Transportation Research Part A37, 2003.
9. Silva, A. B., Santos, S., Gaspar, M., *Turbo-roundabout use and design*, CITTA 6th Annual Conference on Planning Research, Responsive Transports for Smart Mobility, 2013.
10. Stone J., Chae K., Pillalamarri S., *The effect of roundabouts on pedestrian safety*. Prepared for: The Southeastern Transportation Center. Department of Civil Engineering, North Carolina State 2002.
11. Szczuraszek T., *Bezpieczeństwo ruchu miejskiego*, WKiŁ, Warszawa 2005.
12. Varhelyi A., *The effects of small roundabouts on emissions and fuel consumption: a case study*, Transportation Research Part D7, Sweden 2002.
13. Varhelyi A., Hyden C., *The effects on safety, time consumption and environment of large scale use of roundabouts in an urban area: a case study*, Accident Analysis and Prevention 32, Sweden 2000.
14. Federal Highway Administration, United States Department of Transportation, and Washington, D.C.: *Roundabouts: An Informational Guide*. FHWA-RD-00-067, 2000.
15. FHWA (2007). *Traffic Analysis Toolbox Volume IV: Guidelines for Applying CORSIM Microsimulation Modeling Software*, Publication no. fhwa-hop-07-079, 2007.
16. Institute for Road Safety Research. SWOV Fact sheet: Roundabouts. SWOV, Leidschendam, the Netherlands 2007.
17. Transportation Research Board: *Highway Capacity Manual*, 2000.

Evaluation of effectiveness of selected solutions of multilane roundabout intersections

The article concerns the problems of single-lane roundabouts, dual-line and turbo. In the article compared the capacity for option of dual-line roundabout and turbo. For the analysis was selected dual-line roundabout in Rzeszow city, that formed the basis for modeling the turbine roundabout. Modeling and calibrate of analyzed options was held in software to microsimulator of traffic road Vissim. The research results shows, that for the analyzed case of turbo roundabout is characterized by increased capacity, which translates into a reduction of congestions and delays.

Autorzy:

prof. dr hab. Inż. **Kazimierz Lejda** – Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Silników Spalinowych i Transportu

mgr inż. **Maksymilian Mądziel** – Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Silników Spalinowych i Transportu