

MODELOWANIE UKŁADU KATALITYCZNEGO OCZYSZCZANIA SPALIN W SILNIKU O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

Rosnąca liczba pojazdów na świecie oraz zanieczyszczenie środowiska naturalnego powoduje wzrost wymagań w zakresie emisji szkodliwych składników spalin. Ograniczanie emisji szkodliwych składników spalin pochodzących ze spalania paliw w silnikach zasilających środki transportu oraz emisji pyłów z innych układów i elementów pojazdów (np. układy hamulcowe) stały się priorytetowymi zadaniami dla konstruktorów i eksploataatorów urządzeń silnikowych. W artykule omówiony został problem emisji toksycznych składników spalin przez silniki spalinowe stosowane w ciągnikach rolniczych. W artykule zaprezentowano przebieg badań symulacyjnych działania układu oczyszczania spalin składającego się z DOC oraz SCR dla konkretnego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym. Emisję składników toksycznych dla badanego silnika uzyskano na drodze badań empirycznych.

WSTĘP

Światowy przemysł motoryzacyjny podlega obecnie wielkim zmianom związanym z takimi problemami jak: skażenie środowiska naturalnego, globalne ocieplenie, produkcja odpadów czy starzenie się społeczeństw krajów rozwiniętych [11]. Z powyższych powodów na pierwsze miejsce wysunęły się aspekty związane z ochroną środowiska naturalnego. Jak zauważają autorzy [1], największym wyzwaniem w działalności badawczej dziś jest opracowanie rozwiązań w pobliżu zerowej emisji zasilania pojazdów. Jednym ze sposobów przeciwdziałania tym zagrożeniom jest ograniczanie emisji szkodliwych składników spalin pochodzących ze spalania paliw w silnikach zasilających środki transportu oraz emisji pyłów z innych układów i elementów pojazdów (np. układy hamulcowe).

Spaliny emitowane z pojazdów samochodowych są dominującym źródłem zanieczyszczenia powietrza na obszarach miejskich i mają negatywny wpływ na zdrowie ludzi, jakość powietrza i środowisko [2, 3, 6, 7, 9, 12, 16], mają też negatywny wpływ na globalne zmiany klimatu [10, 14]. Gazy spalinowe to mieszanina związków chemicznych, które są zależne od rodzaju paliwa, stanu technicznego silnika i zastosowanego urządzenia do obniżania emisji [14]. Produkcję spalin na całym świecie szacuje się na 10 miliardów metrów sześciennych rocznie [14]. W związku z tym pojawiły się normy czystości spalin. Pierwsze normy poziomu emisji spalin zostały wprowadzone na obszarze Kalifornii w roku 1966. Spowodowało to zmianę ustawodawstwa oraz rozwój systemów ograniczających emisję spalin z silników zasilających pojazdy samochodowe na całym świecie. Następnie zaczęto wprowadzać kolejne obostrzenia dotyczące emisji spalin z samochodów osobowych oraz pojazdów dostawczych. Zmniejszenie emisji szkodliwych substancji pochodzących od nowoczesnych pojazdów było możliwe dzięki wdrożeniu kolejnych restrykcyjnych norm EURO oraz wprowadzeniu układów oczyszczania spalin [4]. Od 1 stycznia 2015 roku obowiązują też nowe normy Etap IV (ang. Stage IV) [19], dotyczące emisji związków toksycznych przez maszyny samojezdne nieporuszające się po drogach, czyli m.in. ciągniki rolnicze, maszyny budowlane napędzane silnikami spalinowymi o zapłonie samoczynnym. Wymagania stawiane dla silników spalinowych sprawiają, że konieczne jest, aby szukać różnych rozwiązań technicznych w celu

zmniejszenia emisji spalin, zużycia paliwa i poprawy właściwości trakcyjnych silnika [5, 18]. Nowe rozwiązania wymagają zintegrowanego podejścia, które obejmuje system sterowania wtrysku paliwa, oczyszczania spalin i układu sterującego pracą silnika (ECU).

W tabeli 1, zestawiono normy jakości spalin dla samochodów zasilanych silnikami o zapłonie samoczynnym oraz czas ich obowiązywania.

Tab. 1. Dopuszczalne wartości emisji spalin dla silników o zapłonie samoczynnym

Nazwa normy	Data obowiązywania normy, od:	Składniki spalin [g/km]				
		CO	HC	NOx	HC+NOx	PM
EURO 1	1.07.1992 r.	3,16	-	-	1,13	0,14
EURO 2	1.10.1996 r.	1,0	0,15	0,55	0,7	0,08
EURO 3	1.10.2001 r.	0,64	0,06	0,5	0,56	0,05
EURO 4	1.10.2006 r.	0,5	0,05	0,25	0,3	0,009
EURO 5	1.10.2009 r.	0,5	0,05	0,18	0,23	0,005
EURO 6	1.01.2014 r.	0,5	0,05	0,08	0,17	0,005

Od szeregu lat prowadzi się badania nad paliwami pochodzącymi ze źródeł naturalnych, które mogą zastąpić częściowo lub całkowicie paliwa z przeróbki ropy naftowej [15]. Jako paliwa zastępcze najczęściej wykorzystywane w silnikach o zapłonie samoczynnym (ZS) możemy podać paliwa ciekłe pochodzenia roślinnego lub innego, oraz paliwa gazowe [15]. Obecnie występują dwie metody na obniżenie emisji związków szkodliwych, które koncentrują się na ograniczaniu ich powstawania w silniku oraz oczyszczaniu wygenerowanych spalin. W pierwszym przypadku możliwe jest to poprzez optymalizację konstrukcji silnika oraz dodatkowe systemy ograniczające jak na przykład stosowanie paliw ekologicznych. Druga grupa metod to metody pośrednie, mające na celu usuwanie substancji szkodliwych z gazów spalinowych silnika [8]. Jednym ze sposobów zmniejszania poziomu emisji związków trujących jest stosowanie reaktorów katalitycznych DOC (ang. Diesel Oxidation-Catalysts). Reaktory te utleniają niespalone węglowodory oraz CO. Reaktory utleniające usuwają również część organicznej frakcji rozpuszczalnej SOF (ang. Soluble Organic Fraction), która jest składnikiem cząstek stałych PM (ang. Particulate Matter). W celu dalszego

obniżenia emisji cząstek stałych wykorzystuje się filtry cząstek stałych o stałej regeneracji CRT (ang. ContinuousRegeneration-Traps). Jednakże podstawowym problemem silników o zapłonie samoczynnym jest emisja tlenków azotu. Ze względu na nadmiar tlenu w mieszaninie paliwowo-powietrznej, tlenki azotu nie mogą być zredukowane w reaktorach 3-funkcyjnych. W pojazdach ciężarowych oraz w większych ciągnikach rolniczych stosuje się układy selektywnego oczyszczania spalin SCR (ang. SelectiveCatalyticReduction NO_x). Reaktory SCR niestety działają w wąskim przedziale temperaturowym, co nieco obniża ich skuteczność. Należy również podkreślić, że wykorzystanie biopaliw zwiększa emisję NO_x, przez co problem ten staje się coraz bardziej istotny, w świetle dążeń do zwiększenia udziału paliw odnawialnych.

W niniejszym artykule poruszono problematykę emisji toksycznych składników spalin przez silniki spalinowe stosowane w ciągnikach rolniczych. Na podstawie badań stanowiskowych określono emisję spalin silnika niewyposażonego w układ oczyszczania spalin, a następnie przeprowadzono badania modelowe. Aby ocenić stopień obniżenia emisji poprzez zastosowanie układu oczyszczania spalin, przeprowadzono badania symulacyjne działania układu składającego się z DOC oraz SCR dla otrzymanego składu spalin. W badaniach wykorzystano oprogramowanie komputerowe BOOST AVL, AST w ramach programu University Partnership [17].

1. PRZEBIEG BADAŃ

1.1. Budowa stanowiska pomiarowego

Badania empiryczne wykonano na 4-cylindrowym silniku o zapłonie samoczynnym Perkins typu 1104D-44TA. Silnik ten stosowany jest między innymi do ciągników rolniczych firmy URSUS. Charakteryzuje się mocą maksymalną 83 kW rozwijaną przy prędkości obrotowej wału korbowego 2200 obr/min. Silnik wyposażony jest w turbosprężarkę oraz chłodnicę powietrza dolotowego. Jednostka ta nie jest wyposażona w układ oczyszczania spalin i posiada homologację na zgodność z normą Etap IIIA (ang. Stage IIIA). Podstawowe parametry techniczne badanego silnika zestawiono w tabeli 2.

Tab. 1. Parametry techniczne silnika PERKINS 1104D-44TA [13]

Parametr	Wartość
Objętość skokowa	4400 cm ³
Średnica tłoka	105 mm
Skok tłoka	127 mm
Stopień sprężania	16,2 : 1
Moc / prędkość obrotowa	83 kW/2200 obr/min
Maksymalny moment obrotowy / prędkość obrotowa	418 Nm/ 1400 obr/min
Rodzaj zasilania paliwem	Bezpośredni wtrysk paliwa
System doładowania	Turbodoładowanie z chłodnicą powietrza
Rodzaj paliwa	Olej napędowy

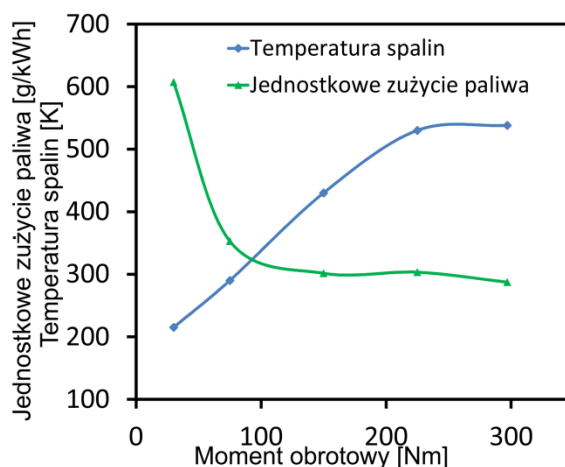
W celu uzyskania danych dotyczących emisji składników toksycznych emitowanych przez badany silnik, przeprowadzono badania empiryczne. Silnik zainstalowano na stanowisku do badań dynamometrycznych i obciążono go hamulcem elektrowirowym Schenk W130. Do pomiaru składu spalin wykorzystano wieloskładnikowy system analityczny AVL Sesam FTIR. W trakcie badań mierzono również zużycie paliwa przy pomocy miernika masowego. Współczynnik nadmiaru powietrza określano za pomocą szeroko-pasmowej sondy lambda. Silnik dodatkowo został wyposażony w układy mające na celu pomiar temperatury powietrza dolotowego, spalin oraz cieczy chłodzącej, a także ciśnienia w układzie dolotowym. Na rysunku 1 pokazano stanowisko na którym zostały przeprowadzone badania.



Rys. 1. Stanowisko badawcze z zainstalowanym silnikiem PERKINS 1104D-44TA

1.2. Warunki pomiaru emisji spalin badanego silnika

Pomiary wykonano w warunkach charakterystyki obciążeniowej. Prędkość obrotowa określono na poziomie 2200 obr/min. Badania przeprowadzono w stałych warunkach gdzie temperatura cieczy chłodzącej wynosiła 82 °C, a temperatura oleju w granicach 90 °C. W każdym analizowanym punkcie charakterystyki obliczono zużycie paliwa oraz strumień masowy spalin. Ta ostatnia wielkość wraz z wartościami stężeń molowych poszczególnych składników spalin posłużyły do określenia sprawności katalitycznej układu oczyszczania spalin. Na rysunku 2 pokazano uzyskane wartości jednostkowego zużycia paliwa i temperatury spalin.

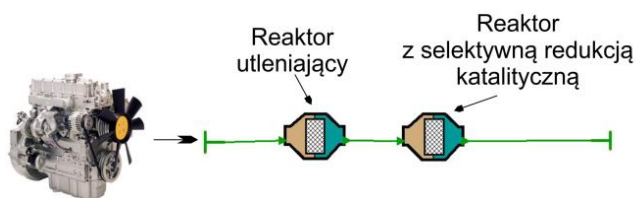


Rys. 2. Wpływ obciążenia na jednostkowe zużycie paliwa i temperaturę spalin

1.3. Badania modelowe układu oczyszczania spalin

Jako narzędzie do obliczeń redukcji składników toksycznych przez układu oczyszczania spalin wykorzystano oprogramowanie AVL Boost. Jest to zaawansowany program służący do modelowania matematycznego na platformie zerowymiarowej, a także jednowymiarowej procesów zachodzących w silniku spalinowym [17].

Korzystając z opisanego oprogramowania stworzono model przykładowego układu oczyszczania spalin składającego się z reaktora utleniającego oraz reaktora z selektywną redukcją katalityczną (rys.3).

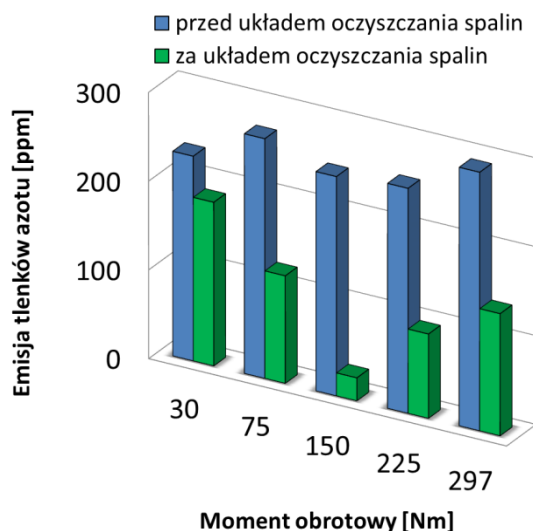


Rys. 3. Schemat układu oczyszczania spalin zbudowanego z reduktora utleniającego oraz reaktora z selektywną redukcją katalityczną

Rzeczywiste wartości emisji składników toksycznych uzyskane z pomiaru empirycznego wprowadzono do modelu i następnie przeprowadzono symulację. Założono, że w każdych z analizowanych warunków występuje stechiometryczna dawka roztworu wodnego mocznika, która wymaga jest do całkowitej redukcji poszczególnych tlenków azotu.

2. WYNIKI MODELOWANIA

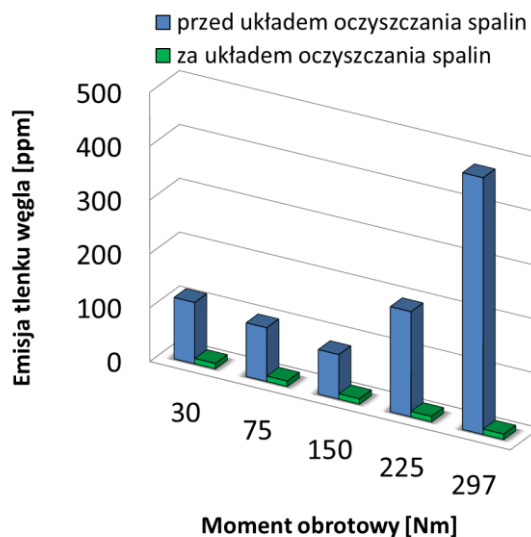
Efekty symulacji przedstawiono w niniejszym rozdziale. Podczas badań wzięto pod uwagę trzy składniki spalin tj. tlenki azotu (NO_x), tlenek węgla (CO) oraz węglowodory (HC). Analizując uzyskane wyniki można zaobserwować, że układ oczyszczania spalin działa najefektywniej (w odniesieniu do redukcji NO_x) przy średnich obciążeniach. Dla momentu obrotowego wynoszącego 150 Nm uzyskano redukcję NO_x z wartości 247 ppm do ok 25 ppm. W zakresie małych obciążeń i niskich temperatur spalin uzyskano małe wartości stopnia konwersji. Przy mocy znamionowej silnika także zaobserwowano spadek sprawności modelowanego układu oczyszczania spalin. Zauważono również zjawisko polegające na produkcji tlenków azotu przez reaktor oksydacyjny.



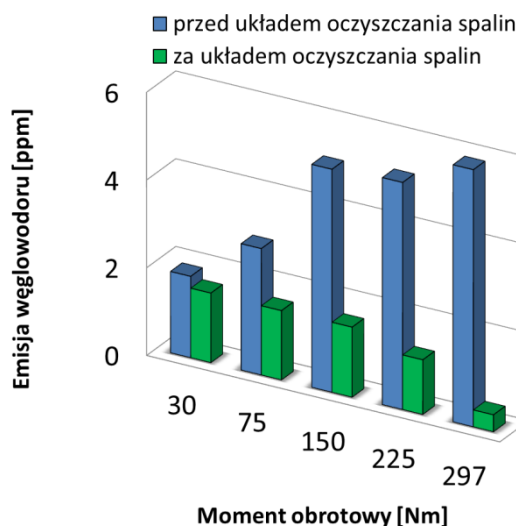
Rys. 4. Emisja tlenków azotu przed i za układem oczyszczania spalin

Tak jak oczekiwano, sprawność konwersji węglowodorów w dużym stopniu zależy od obciążenia silnika i co za tym idzie, temperatury spalin (Rys. 5). Podczas pracy z najmniejszym badanym obciążeniem redukcja węglowodorów wynosiła niewiele ponad 20%. Przy maksymalnym momencie obrotowym 297 Nm stężenie HC uległo redukcji o około 93%.

Można zauważyć, że uzyskano niemal całkowite utlenienie CO (Rys. 6). Wynika to z tego, że temperatura 50% konwersji tlenku węgla jest o wiele niższa od temperatur konwersji węglowodorów



Rys. 5. Emisja tlenku węgla przed i za układem oczyszczania spalin



Rys. 6. Emisja węglowodoru przed i za układem oczyszczania spalin

PODSUMOWANIE

Rosnąca liczba pojazdów na świecie oraz zanieczyszczenie środowiska naturalnego powoduje wzrost wymagań w zakresie emisji szkodliwych składników spalin [11]. Ostatnie działania władzy ustawodawczej zmierzają do ograniczeń emisji również z maszyn i pojazdów nie poruszających się po drogach publicznych, czego wyrazem jest wejście w życie normy Stage IV dla różnych zakresów mocy silników. Zmiany legislacyjne w nowych obszarach eksploatacji, wymuszają na konstruktorach poszukiwanie możliwości adaptacji i modernizacji układów oczyszczania spalin w silnikach spalinyowych tych maszyn. W niniejszym opracowaniu autorzy skoncentrowali się na badaniach modelowych i eksperymentalnych silnika spalinowego o zapłonie samoczynnymciągnika rolniczego średniej mocy.

PODZIĘKOWANIA

Niniejsza praca została opracowana w ramach projektu „Stypendia naukowe dla doktorantów pracujących w ramach zespołów badawczych”, Program Operacyjny Kapitał Ludzki 2007-2013, Priorytet VIII Regionalne kadry gospodarki, Działanie 8.2 Transfer wiedzy, Poddziałanie 8.2.2 Regionalne Strategie Innowacji, współfi-

nansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego, budżetu państwa oraz budżetu Województwa Lubelskiego. Problem badawczy: System oczyszczania spalin silnika ciągnika rolniczego zasilanego paliwem ropopochodnym oraz paliwami odnawialnymi. Czas realizacji projektu od kwietnia 2014 do września 2015 roku. Autorzy pragną podziękować firmie AVL za udostępnienie oprogramowania AST w ramach programu University Partnership.

BIBLIOGRAFIA

1. Barta D., Mruzek M., Kendra M., Kordos P., Krzywonos L. *Using of non-conventional fuels in hybrid vehicle drives*. „Advances in Science and Technology-Research Journal” 2016, vol. 10, no 32, pp. 240-247.
2. Borbon A., Gilman J.B., Kuster W.C., Grand N., Chevallier S., Colomb A., de Gouw J.A. *Emission ratios of anthropogenic volatile organic compounds in northern mid-latitude megacities: Observations versus emission inventories in Los Angeles and Paris*. „Journal of Geophysical Research – Atmospheres” 2013, 118 no. 4, 2041-2057.
3. Brady J.M., Crisp T.A., Collier S., Kuwayama T., Forestieri S.D., Perraud V., Bertram T.H., *Real-time emission factor measurements of isocyanic acid from light duty gasoline vehicles*. „Environmental Science and Technology” 2014, 48 no. 19, 11405-11412.
4. Caban J., Drożdżel P., Liščák Š., Šarkan B., *Badania emisji pojazdów z silnikami o zapłonie samoczynnym w wybranej SKP-ŻU w Żilinie na Słowacji*. „Logistyka” 2014, nr 3, s. 938-945.
5. Fiebig, M., Wiartalla, A., Holderbaum, B., Kiesow, S., *Particulate emissions from diesel engines: correlation between engine technology and emissions*. „Journal of Occupational Medicine and Toxicology” 2014, Vol. 9, article number 6.
6. Franco V., Kousoulidou M., Muntean M., Ntziachristos L., Hausberger S., Dilara P., *Road vehicle emission factors development: a review*. „Atmospheric Environment” 2013, 70(0), 84-97.
7. Kampf R., Stopka O., Bartuska L., Zeman K., *Circulation of vehicles as an important parameter of public transport efficiency*. In Transport Means - Proceedings of the 19th International Scientific Conference on Transport Means, Kaunas (Lithuania) Kaunas University of Technology, 2015, p. 143-146.
8. Kruszyński S.W., Danilczuk W., *Ograniczenie szkodliwych gazów wylotowych silników spalinowych poprzez zastosowanie reaktorów katalitycznych*. „MOTROL” 2007, nr 9, s. 93-102.
9. Longwic R., Sen A.K., Górski K., Lotko W., Litak G., *Cycle-to-Cycle Variation of the Combustion Process in a Diesel Engine Powered by Different Fuels*. „Journal of Vibroengineering” 2011, Vol. 13, Issue 1. pp. 120-127.
10. Majerová Z., Vrábel J., *Environmentálneproblémy v doprave*. „Podniková ekonomika a manažment” Rok 2013, Číslo 1, s. 70-74.
11. Merkisz J., Pielecha I., Pielecha J., Brudnicki K., *Ekologiczność pojazdów z systemem start/stop w rzeczywistych warunkach ruchu miejskiego*. „Logistyka” 2010, nr 6, s. 2217-2226.
12. Moussa S.G., Leithead A., Li S.M., Chan T.W., Wentzell J.J.B., Stroud C., Zhang J., Lee P., Lu G., Brook J.R., Hayden K., Narayan J., Liggio J., *Emissions of hydrogen cyanide from on-road gasoline and diesel vehicles*. „Atmospheric Environment” 2016, no 131, 185-195.
13. Publication No. 1836/01/08, Produced in England, Perkins Engines Company Limited, ©2008.
14. Rievaj V., Kalašová A., Majerová Z., *Emisie cestných vozidiel*. „Svetdopravy” (23 Mar 2014), online, <http://www.svetdopravy.sk/emisie-cestnych-vozidiel/>
15. Suhecki A., Nowakowski J., *Eksploatacyjne aspekty zasilania silnika o zapłonie samoczynnym olejem napędowym z dodatkiem FAME*. „Autobusy” 2016, nr 6, s. 1148-1154.
16. Takizad F., *Investigation of Exhaust Emission Factors Based on Vehicle Models*. „Current World Environment” 2012, 7, no. 1, 79.
17. User Guide, AVL Boost Version 2009.1, Edition 11/2009.
18. Wallington, T. J., Lambert, C. K., Ruona, W. C., *Diesel vehicles and sustainable mobility in the U.S.* „Energy Policy” 2013, Vol. 54, pp. 47-53.
19. <http://cumminsemissionsolutions.com/CES>

Modeling the catalytic reduction system in self-ignition engine

The increasing number of vehicles in the world and environmental pollution increases the requirements for pollutant emissions. Reducing pollutant emissions originating from the combustion of fuels for engines supplying means of transport and dust emissions from the other systems and vehicle components (e.g. braking systems) became the main tasks for designers and exploiters of motor vehicles. The article discusses the problem of emission of toxic exhaust gas components by internal combustion engines used in agricultural tractors. The article presents the simulation of the exhaust gas cleaning system consisting of DOC and SCR for a specific diesel engine. The emission of toxic elements for the test engine is obtained by empirical research.

Autorzy:

mgr inż. **Jacek Caban** – Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Wydział Inżynierii Produkcji, Katedra Maszyn Rolniczych i Transportowych, 20-612 Lublin, ul. Głęboka 28, jacek.caban@up.lublin.pl

mgr inż. **Michał Gęca** – Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Instytut Transportu, Silników Spalinowych i Ekologii, 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36, michal.geca@pollub.pl

dr hab. inż. **Jacek Hunicz** prof. PL – Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Instytut Transportu, Silników Spalinowych i Ekologii, 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36; j.hunicz@pollub.pl

mgr inż. **Dariusz Kasperek** – Ursus S.A., 20-209 Lublin, ul. Frezerów 7.