

Krzysztof Górski, Wincenty Lotko, Jerzy Stobiecki

# Wpływ eteru dietylowego w mieszaniu z olejem napędowym na dynamikę przyspieszania silnika o zapłonie samoczynnym

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2018.424

Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

Artykuł przedstawia wyniki oceny procesu przyspieszania wału korbowego silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego mieszaninami oleju napędowego (ON) i eteru dietylowego (DEE). W szczególności badano mieszaniny zawierające 5, 10, 15 i 20 % objętościowo DEE w ON. Uzyskane rezultaty badań potwierdziły negatywny wpływ DEE dodawanego do ON na proces przyspieszania silnika AD3.152. Należy jednak zauważyć, że badania wykonano dla nominalnej regulacji aparatury wtryskowej tego silnika. Oznacza to, że nie były optymalne dla badanych mieszanin o odmiennych właściwościach fizykochemicznych w stosunku do ON.

**Słowa kluczowe:** DEE, silnik diesla, paliwa alternatywne, mieszaniny paliwowe.

## Wstęp

Podstawowym paliwem do silników o zapłonie samoczynnym są różne rodzaje oleju napędowego. W zależności od warunków klimatycznych jest on produkowany w odmianach, które są dostosowane m.in. do sezonowych zmian temperatury otoczenia. Dodatkowo wszystkie oleje napędowe, które spełniają wymagania normy EN590 mogą zawierać dodatki pochodzenia roślinnego w łącznej objętości do 7 %. Są to zazwyczaj estry nienasyconych kwasów tłuszczowych, które muszą spełniać wymagania jakościowe normy EN14214. W ten sposób uzyskiwane są oleje napędowe, które z założenia powinny być ekologiczne, tzn. proces ich produkcji i spalania jest korzystniejszy w stosunku do paliwa konwencjonalnego. Na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat aspekty ekologiczne w istotny sposób przyczyniły się do rozwoju konstrukcji układu zasilania silnika, metod oczyszczania spalin oraz kompozycji paliw silnikowych. W efekcie silniki o zapłonie samoczynnym stały się złożonymi obiektami technicznymi, w których wykorzystano technologie niemożliwe do dalszego rozwoju. Można stwierdzić, że dalszy rozwój istniejących technologii wtrysku paliwa oraz oczyszczania produktów spalania jest nieefektywny ekonomicznie w kontekście uwarunkowań ekologicznych, które są narzucane producentom pojazdów przez odpowiednie europejskie normy. Z tego powodu coraz większa grupa tych producentów deklaruje wycofanie ze swojej oferty silników o zapłonie samoczynnym, które są stosowane do napędu lekkich pojazdów. Jednak w dalszym ciągu silniki o zapłonie samoczynnym będą stosowane w ciężkich pojazdach, w których układy hybrydowego napędu lub w pełni elektrycznego nie spełniają oczekiwanych funkcjonalności, m.in. w zakresie ceny, wydajności, infrastruktury ładowania i wielu innych. Biorąc to pod uwagę można uznać, że poszukiwanie alternatywnych sposobów ograniczenia szkodliwego wpływu procesu spalania paliw w silnikach diesla jest w dalszym ciągu uzasadnione. Z tego powodu prowadzone są liczne badania nad zastosowaniem w silnikach o zapłonie samoczynnym nowych paliw, a szczególnie tych które

można uzyskać z odnawialnych zasobów. W klasycznym ujęciu są to oleje roślinne i ich pochodne jak np. estry metylowe lub etylowe kwasów tłuszczowych. W pewnym zakresie rozwinięto technologie spalania etanolu w tzw. dwupaliwowych silnikach o zapłonie samoczynnym. Etanol jest cennym surowcem energetycznym, który używa się zarówno w procesie syntezy chemicznej jak również poprzez fermentację biomasy. Zastosowano w praktyce etanol w mieszaniu z olejem napędowym do zasilania silnika o zapłonie samoczynnym. W takim przypadku, z uwagi na polarność cząsteczki etanolu uzyskanie stabilnej mieszaniny paliwowej wymagało użycia odpowiednich emulgatorów. Nie zawsze takie działania były w pełni korzystne i prowadziły do uzyskania oczekiwanych efektów energetycznych, ekonomicznych i ekologicznych. Biorąc to pod uwagę rozważono wykorzystanie etanolu jako surowca do produkcji wybranych eterów, o potencjalnym zastosowaniu jako komponent oleju napędowego. Właściwości fizykochemiczne takich eterów są znacząco odmiennie i dlatego ich spalanie w silniku o zapłonie samoczynnym powoduje różne efekty energetyczne i ekologiczne.

## 1. Etery jako paliwa silnikowe

Jak już wskazano jednym z najbardziej powszechnych, alternatywnych paliw dla silników spalinowych jest etanol. Z uwagi na jego wysoką liczbę oktanową stanowi on bardzo dobry dodatek do benzyn silnikowych. Wielu producentów paliw wykorzystuje go do produkcji eteru etylo tert butylowego (EETB), który jest kolejnym powszechnie stosowanym dodatkiem do benzyn. Prowadzono również badania w zakresie możliwości wykorzystania tego eteru jako dodatku do oleju napędowego i jego wpływu na emisję silnika [1]. Stwierdzono, że dodatek do 40% objętościowo EETB do ON pozwala uzyskać stabilne i transparentne mieszaniny paliwowe oraz ograniczyć emisję niektórych, szkodliwych składników spalin. Jednak zauważono, bardzo niska liczba cetanowa (LC) badanego eteru miała niekorzystny wpływ na proces przygotowania paliwa do spalania. W efekcie silnik mógł pracować z nadmiernymi przyrostami ciśnienia w komorze spalania, co nie sprzyjało zachowaniu trwałości skojarzenia tłok-pierścienie-cylinder (T-P-C). W związku z tym w dalszych badaniach skupiono uwagę na innym eterze, który jest wytwarzany z etanolu i charakteryzuje się korzystniejszymi w stosunku do EETB właściwościami fizykochemicznymi dla silników o zapłonie samoczynnym. Doniesienia literaturowe wskazują, że może nim być eter dietylowy (DEE). W publikacji [2] przedstawiono informację dotyczącą LC eteru dietylowego, które wykazały że jest to substancja o znacznej skłonności do samozapłonu. Oznaczona LC DEE osiągnęła wartość 125 jednostek. Od tego czasu w wielu publikacjach powszechnie podawana jest informacja jakoby DEE charakteryzował się LC na poziomie 125 jednostek. Tymczasem należy podkreślić, że oznaczenie LC nie zostało wykonane przy pomocy silnika badawczego wg metody EN5165, ale przy pomocy tzw. komory spalania o stałej objętości.

Należy podkreślić, że rezultaty oznaczenia LC przy pomocy wskazanych metod są nieporównywalne. Pomimo to uznano, że

DEE jest interesującą substancją, którą warto rozważyć jako dodatek do oleju napędowego. Przemawia za tym kilka czynników jak np.: niska polarność cząsteczek eteru dietylowego warunkująca jego bardzo dobrą mieszalność z ON, odnawialność surowca, niska cena wytworzenia, prawdopodobnie wysoka LC oraz pozytywne wyniki badań nad zastosowaniem tego eteru jako paliwa do silników [3-8].

Zestawienie wybranych parametrów fizykochemicznych DEE przedstawiono w tabeli 1.

**Tab. 1.** Wybrane właściwości fizykochemiczne DEE oraz ON

Nazwa parametru	Rodzaj paliwa	
	ON	DEE
CAS no.	-	60-29-7
Cetane number, [-]	51	>125*
Smarność, [ $\mu\text{m}$ ]	380	614
Lepkość kinematyczna w 40 °C, [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ]	2,8	0,23
Gęstość w 15 °C, [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	0,83	0,71
Napięcie powierzchniowe, [ $\text{mN}/\text{m}$ ]	28	16,9
Wartość opalowa, [ $\text{MJ}/\text{kg}$ ]	42,5	33,9
Temperatura zapłonu, [ $^{\circ}\text{C}$ ]	>240	-40
Temperatura wrzenia, [ $^{\circ}\text{C}$ ]	>180	34,6

\* wartość wyznaczona metodą EN 15195

Biorąc pod uwagę dane przedstawione w tabeli 1 można zauważyć, że DEE charakteryzuje się bardzo niską lepkością. Dlatego można oczekiwać, że dodatek DEE do ON obniży lepkość uzyskanej mieszanki. Może to sprzyjać poprawie jakości rozpylenia paliwa w komorze spalania i poprawić wskaźniki ekologiczne silnika. Będzie temu sprzyjać również niższe napięcie powierzchniowe DEE, co ułatwi tzw. wtórny rozpad kropli i skróci okres przygotowania mieszanki palnej do spalania. Jednak DEE posiada również cechy, które mogą stanowić barierę dla jego użycia w silniku o zapłonie samoczynnym. Przede wszystkim stwierdzono, że badany eter charakteryzuje się bardzo niską temperaturą zapłonu, co wymaga w jego transporcie stosowania zasad bezpieczeństwa typowych dla benzyn. Dodatkowo smarność DEE nie odpowiada wymaganiom normy EN590. W związku z tym można oczekiwać, że dodatek DEE do ON pogorszy własności smarne uzyskanej mieszanki. Nie bez znaczenia jest wyraźnie mniejsza wartość opalowa DEE w stosunku do ON. Różnica wynosi aż 19%, co powinno spowodować obniżenie mocy i momentu obrotowego silnika zasilanego mieszankami DEE-ON. Również dynamika przyspieszania wału korbowego takiego silnika powinna ulec wyraźnemu zmniejszeniu. Wskazane niedogodności mogą być zminimalizowane poprzez odpowiednią adaptację układu wtryskowego paliwa.

W niniejszym artykule postanowiono ocenić jaki jest wpływ stosowania dodatku DEE do ON na dynamikę procesu przyspieszania wału korbowego silnika o zapłonie samoczynnym. Badania przeprowadzono dla nominalnych regulacji aparatury wtryskowej, dostosowanej do wymagań oleju napędowego

## 2. Metody i materiały badawcze

### 2.1. Badane paliwa

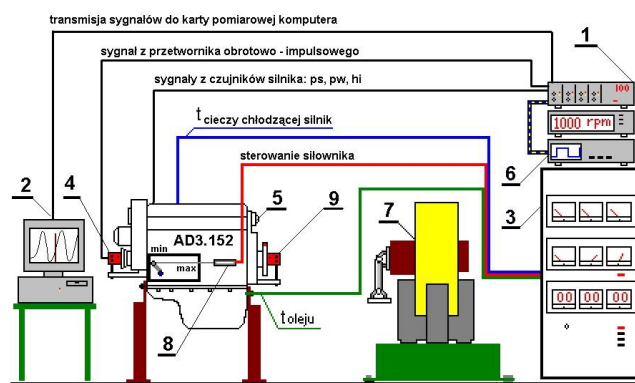
W badaniach wykorzystano ON oraz DEE, których wybrane właściwości fizykochemiczne przedstawiono w tabeli 1. Wykorzystując te bazowe paliwa przygotowano mieszanki zawierające: 5, 10, 15 i 20% (v/v) dodatku DEE w ON. W ten sposób uzyskano mieszanki o oznaczeniach odpowiednio: DEE5, DEE10, DEE15 i DEE20. Ich wybrane właściwości fizykochemiczne przedstawiono w tabeli 2.

**Tab. 2.** Wybrane właściwości fizykochemiczne badanych mieszanin

Nazwa parametru	Zawartość DEE w ON (v/v)			
	5	10	15	20
Wartość opalowa, [ $\text{MJ}/\text{kg}$ ]	42,3	41,9	41,5	41,0
Gęstość w 15 °C, [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	827	820	816	813
Lepkość w 40 °C, [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ]	2,32	1,85	1,66	1,52
Liczba cetanowa, [-]	51	52	53	54
Napięcie powierzchniowe, [ $\text{mN}/\text{m}$ ]	27,1	26,8	26,2	25,4

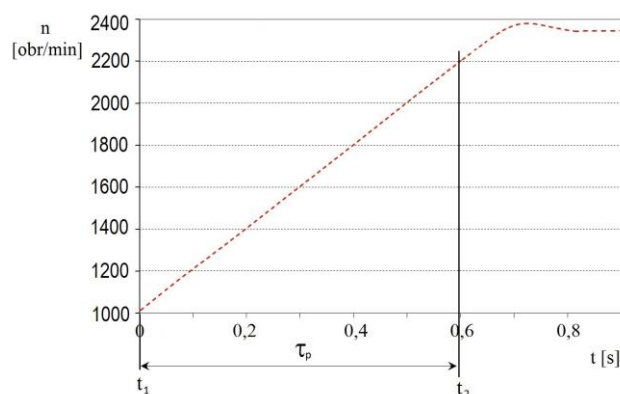
### 2.2. Charakterystyka stanowiska badawczego

Badania przeprowadzono przy pomocy silnika AD3.152, który wyregulowano według danych producenta. Silnik został podłączony do komputerowego systemu sterowania pracą pompy wtryskowej paliwa. Dzięki niemu było możliwe zachowanie porównywalnych warunków początkowych procesu swobodnego przyspieszania wału korbowego. W szczególności zachowano synchronizację procesu rozpędzania silnika w zależności od chwilowego położenia kąowego jego wału korbowego. W praktyce operator systemu pomiarowego aktywował procedurę pomiarową poprzez naciśnięcie w programie sterującym ikonę „Start”. Następnie system komputerowy oczekiwał na sygnał z czujnika położenia wału korbowego, który synchronizowano z tzw. górnym martwym położeniem tłoka w pierwszym cylindrze. Po zidentyfikowaniu tego położenia przez system komputerowy aktywował on siłownik, który gwałtownie zwiększał dawkowanie paliwa dostarczanego do komory spalania. Schemat stanowiska badawczego pokazano na rys. 1.



**Rys. 1.** Schemat stanowiska badawczego z silnikiem AD3.152

Następnie silnik gwałtownie przyspieszał od prędkości obrotowej biegu jałowego do maksymalnej. Podczas tego procesu rejestrowano zmiany położenia kąowego wału korbowego w czasie. Na tej podstawie wyznaczono charakterystykę dynamiczną zmian prędkości obrotowej wału korbowego. Jej przykład, po wygłuszeniu fluktuacji chwilowej prędkości obrotowej wału korbowego, pokazano na rysunku 2.

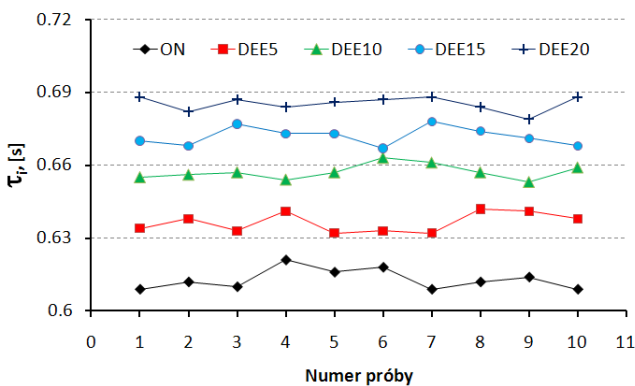


**Rys. 2.** Przykładowa charakterystyka dynamiczna silnika AD3.152

Jako parametr opisujący dynamikę procesu przyspieszania silnika przyjęto okres czasu, w którym wał korbowy przyspiesza od chwili  $t_1$  do  $t_2$ . Chwila  $t_1$  odpowiada 1000 obr/min tj. początkowej prędkości wału, przy której rozpoczyna się proces jego przyspieszania. Natomiast w chwili  $t_2$  wał korbowy osiąga prędkość 2200 obr/min (Rys. 2). Dla każdego rodzaju paliwa, którym był zasilany testowany silnik wykonano 10 prób przyspieszeń. Następnie wyznaczono wartość średnią  $\tau_{sr}$ , którą wykorzystano do opracowania wniosków.

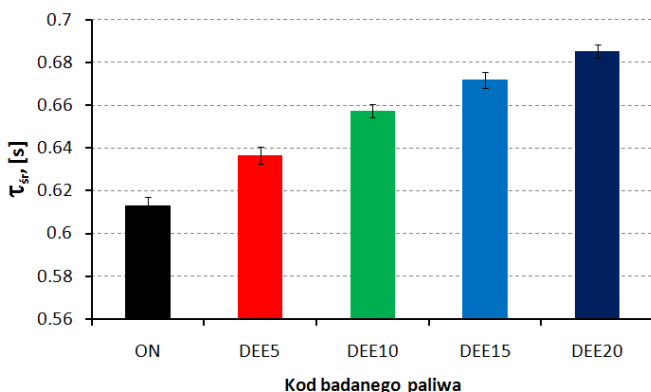
### 3. Rezultaty badań

Silnik AD3.152 rozgrzano do temperatury normalnej pracy, a następnie dla każdego badanego paliwa wykonano 10 kolejnych prób przyspieszeń wału korbowego. Na tej podstawie wyznaczono wartość czasu przyspieszania w poszczególnych próbach. Otrzymane rezultaty przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Wpływ badanego paliwa na wartość czasu przyspieszania wału korbowego silnika AD3.152

Na podstawie oceny rysunku 3 można stwierdzić, że rodzaj badanego paliwa miał wpływ na uzyskane wartości czasu przyspieszania wału korbowego silnika AD3.152. W każdym przypadku obserwowana jest pewna zmienność uzyskanych rezultatów, która jest spowodowana niepowtarzalnością procesu sterowania silnika oraz zjawisk zachodzących podczas spalania paliwa. Biorąc to pod uwagę do dalszej analizy wyznaczono wartości średnie czasu przyspieszania oraz odchylenie standardowe. Otrzymane wyniki przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wpływ badanego paliwa na dynamikę przyspieszania wału korbowego silnika AD3.152

Ocena rysunku 4 potwierdza, że najkrótszy czas przyspieszania uzyskano dla badanego silnika zasilanego olejem napędowym. Dodatek DEE do tego oleju powodował wzrost wartości czasu, w którym wał korbowy rozpędzał się od prędkości początkowej do maksymalnej. Oznacza to, że dodatek badanego eteru miał nega-

tywny wpływ na dynamikę procesu przyspieszania silnika. W szczególności zauważono, że w przypadku paliwa DEE5 czas rozpędzania wału był o ok. 3 % większy w stosunku do wartości uzyskiwanych dla oleju napędowego. W przypadku mieszaniny zawierającej 20 % (v/v) DEE proces rozpędzania był o ok. 12% dłuższy niż dla silnika zasilanego konwencjonalnie. Przyczyn takich rezultatów należy doszukiwać się w odmiennych właściwościach fizykochemicznych badanych paliw, które decydują o efektywności procesu ich spalania. Jak już wspomniano, eter dietylowy charakteryzuje się wyraźnie mniejszą wartością opałową w stosunku do oleju napędowego. W związku z tym dodatek DEE do ON będzie obniżał wartość opałową mieszaniny dostarczonej do komory spalania. W konsekwencji spalania paliwa zostanie uwolniona mniejsza ilość energii cieplnej. W związku z tym można oczekiwać niższych wartości ciśnienia w komorze spalania i mniejszych sił działających na tłok. W takim przypadku proces przyspieszania będzie tym bardziej wydłużony im więcej DEE zostanie dostarczone do komory spalania. Należy również zauważyć, że DEE charakteryzuje się niewielką lepkością i napięciem powierzchniowym. Oznacza to, że jego dodanie do ON spowoduje obniżenie lepkości i napięcia powierzchniowego mieszaniny paliwowej. Dzięki temu proces jej rozpylenia powinien zachodzić korzystniej w aspekcie jakościowym. Wskazany czynnik może sprzyjać poprawie sprawności procesu spalania i częściowo kompensować negatywny wpływ niskiej wartości opałowej DEE na dynamikę procesu przyspieszania wału korbowego.

### Podsumowanie

Olej napędowy jest podstawowym paliwem do silników o zapłonie samoczynnym. Jednak postępujące wymagania ekologiczne motywują do poszukiwania alternatywnych rozwiązań. Wśród nich można wskazać stosowanie tzw. dodatków tlenowych, które można uzyskać z odnawialnych zasobów. Takim dodatkiem mogą być niektóre etery, które charakteryzują się odpowiednimi właściwościami fizykochemicznymi. W niniejszym artykule skupiono się na eterze dietylowym, który według doniesień literaturowych charakteryzuje się bardzo dużą wartością liczby cetanowej. Biorąc to pod uwagę postanowiono wykonać badania polegające na określeniu wpływu dodatku DEE do ON na dynamikę procesu przyspieszania wału korbowego silnika AD3.152. W oparciu o uzyskane rezultaty można stwierdzić, że odmienne właściwości fizykochemiczne DEE w stosunku do ON mają wpływ na wydłużenie okresu przyspieszania wału korbowego silnika. Oznacza to, że jego maksymalna moc i moment obrotowy są obniżone z uwagi na niższą wartość opałową DEE w porównaniu do oleju napędowego. Należy jednak podkreślić, że zidentyfikowane zależności uzyskano dla silnika przystosowanego do zasilania wyłącznie olejem napędowym. Zmiana parametrów technicznych układu zasilania, pod kątem spalania DEE może wyraźnie poprawić osiągi silnika. W tym zakresie warto kontynuować odpowiednie badania z uwzględnieniem aspektów ekologicznych tj. pomiaru emisji szkodliwych składników spalin.

### Bibliografia:

- Górski K., Asok K. Sen, Lotko W., Swat M.: Effects of ethyl-tert-butyl ether (ETBE) addition on the physicochemical properties of diesel oil and particulate matter and smoke emissions from diesel engines. FUEL, Vol. 103, 2013
- Bailey B., Eberhardt J., Goguen S., Erwin J. Diethyl ether (DEE) as a renewable diesel fuel. SAE paper no. 972978. 1997.
- Iranmanesh M., Subrahmanyam J. P., Babu M. K. G., Potential of diethyl ether as a blended supplementary oxygenated fuel with biodiesel to improve combustion and emission characteristics of diesel engines, SAE paper no.2008-01-1805, 2008,

4. Imtenan S., Varman M., Masjuki H., Kalman M.A., Sajjad H., Arbab M.I. Effect of DEE as an Oxygenated Additive on Palm Biodiesel-Diesel Blend in the Context of Combustion and Emission Characteristics on a Medium Duty Diesel Engine. *Energy and Biotechnology* 2015, Vol, 85,
5. Górski K. Przedlacki M. Evolution of the influence of Diethyl Ether (DEE) addition on selected physicochemical properties of diesel oil and ignition delay period. *Energy and Fuels*, 2014, Vol. 28,.
6. Senthil R., Sivakumar E., Silambarasan R. Effect of diethyl ether on the performance and emission characteristics of a diesel engine using biodiesel – eucalyptus oil blends. *RSC Adv.*, 2015, 5, 54019.
7. Rakopoulos D. C., Rakopoulos C. D., Giakoumis E. G., Dimaratos A. M. Characteristics of performance and emissions in high-speed direct injection diesel engine fuelled with diethyl ether/diesel fuel blends, *Energy*. Vol. 43, 2012,.
8. Imtenan S., Varman M., Masjuki H., Kalman M.A., Sajjad H., Arbab M.I. Effect of DEE as an Oxygenated Additive on Palm Biodiesel-Diesel Blend in the Context of Combustion and Emission Characteristics on a Medium Duty Diesel Engine. *Energy and Biotechnology*. Vol, 85 2015,

---

### Impact of diethyl ether in blends with diesel fuel on acceleration process of the diesel engine

The paper presents results of the crankshaft acceleration process of the diesel engine fuelled with diesel oil - diethyl ether blends. In particular mixtures of diesel fuel with addition of 5, 10, 15 and 20 % by volume were tested. Results confirmed that DEE addition has negative impact on acceleration process of the AD3.152 engine. However it should be pointed that tests were carried out for nominal settings of the engine fuel injection system. It means that these settings were not optimal for tested blends with different physicochemical properties compared to regular diesel fuel.

---

**Keywords:** DEE, diesel engine, alternative fuels, fuel blends

**Autorzy:**

prof. dr hab. inż. **Wincenty Lotko** - Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, [w.lotko@uthrad.pl](mailto:w.lotko@uthrad.pl)

dr hab. inż. **Krzysztof Górski** - Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, [krzysztof.gorski@uthrad.pl](mailto:krzysztof.gorski@uthrad.pl)

mgr inż. **Jerzy Stobiecki** - Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, [jerzystobiecki@op.pl](mailto:jerzystobiecki@op.pl)