

Niepowtarzalność opóźnienia samozapłonu paliwa w silniku o zapłonie samoczynnym

WINCENTY LOTKO

Politechnika Radomska

Artykuł przedstawia wyniki badań realizowanych z wykorzystaniem silnika AD3.152 zasilanego olejem napędowym (ON) oraz mieszaninami paliwowymi, takimi jak: olej napędowy - eter etylo-tert-butyłowy (EETB), a także: olej napędowy - odwodniony etanol (ET) - estry metylowe nienasyconych kwasów tłuszczowych (FAME). Głównym celem artykułu było przeprowadzenie oceny zmian wartości wskaźnika niepowtarzalności kąta opóźnienia samozapłonu w badanym silniku zasilanym wyżej wymienionymi mieszaninami paliwowymi.

1. Wprowadzenie

Niedoskonałość urządzeń biorących udział w procesie tłoczenia paliwa, jak również występujące wówczas złożone zjawiska przepływowe powodują, że w silniku spalinowym mamy do czynienia z niepowtarzalnością parametrów opisujących ten proces. Chodzi tu mianowicie o początek tłoczenia paliwa, koniec tłoczenia paliwa, czas trwania tłoczenia paliwa, charakter zmian ciśnienia paliwa w funkcji kąta obrotu wału korbowego silnika $p_t=f(\alpha)$. Powoduje to w konsekwencji zmiany opóźnienia samozapłonu paliwa w każdym cyklu roboczym silnika, a także charakter zmian procesu spalania w cylindrze $p_s=f(\alpha)$. Zjawiska te przybierają różne wartości dla paliw o różnych parametrach fizykochemicznych, różniących się np. lepkością. W materiale tym zostaną przedstawione zagadnienia niepowtarzalności opóźnienia samozapłonu dla kolejnych 50 cykli silnika AD3.152 przy jego stałym obciążeniu. Silnik zasilano kolejno: olejem napędowym i porównawczo paliwem ET20 i EETB20. Były to mieszaniny ON z etanolem (ET) oraz eteru etylo-tert-butyłowego (EETB) i estru nienasyconych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego jako emulgatorem (FAME). Ocenę zjawisk niepowtarzalności opóźnienia samozapłonu badanych paliw dla kolejnych cykli procesu roboczego silnika dokonano w oparciu o wskaźnik niepowtarzalności tego parametru.

2. Opóźnienie samozapłonu

Czynniki wpływające na opóźnienie samozapłonu można podzielić na [3 - 12]:

1. Czynniki chemiczne

Najistotniejszym czynnikiem w tej grupie, wpływającym na zmiany okresu opóźnienia samozapłonu τ_s , jest skład chemiczny paliwa i jego lepkość. Paliwa zawierające duże ilości węglowodorów szeregu olefinowego oraz parafinowego charakteryzują się krótkimi okresami opóźnienia samozapłonu τ_s (ze względu na łatwy rozpad łańcuchów węglowodorowych w podwyższonej temperaturze). Te same powody decydują, że wartości τ_s są najmniejsze dla normalnych węglowodorów parafinowych. Spadek τ_s obserwuje się przy rosnącej liczbie cezanowej paliw.

2. Czynniki fizyczne

Spośród tych czynników najistotniejszy wpływ na τ_s mają: temperatura zasysanego powietrza (dla niższych temperatur zasysanego powietrza τ_s jest znacznie większe – wyjaśnia to utrudniony rozruch silnika w niskich temperaturach otoczenia), ciśnienia końca suwu sprężania (dla wyższych p_s okres opóźnienia samozapłonu maleje).

3. Czynniki konstrukcyjne

Spośród tej grupy największy wpływ na okres opóźnienia samozapłonu wykazują: rodzaj komory spalania, średnica cylindra, stopień sprężania, średnie ciśnienie użyteczne, kąt wyprzedzenia wtrysku, rodzaj wtryskiwacza i charakterystyka wtrysku.

4. Czynniki eksploatacyjne

W tej grupie czynników należy wyróżnić: prędkość obrotową silnika, temperaturę cieczy chłodzącej silnik, obciążenie silnika, kąt wyprzedzenia wtrysku, szczelność komory spalania, współczynnik nadmiaru powietrza, pozostałość spalin.

Spośród wymienionych, głównych czynników mających wpływ na opóźnienie samozapłonu zbadane zostały następujące [4, 9, 11]:

- gęstość badanych paliw,
- lepkość badanych mieszanek paliwowych,
- prędkość obrotowa silnika,
- obciążenie silnika.

3. Określenie wartości opóźnienia samozapłonu

W analizach teoretycznych wykresu indykatorowego silnika zachodzi konieczność stosowania analitycznej metody do określania wartości τ_s . Wśród licznych proponowanych formuł według J. B. Heywooda najlepiej spełnia te wymogi metoda Hardenberga i Hasego. Zaproponowaną formułę przez Hardenberga i Hasego do obliczeń samozapłonu paliwa w silnikach o zapłonie samoczynnym przedstawia wzór (1) [1, 2]:

$$\tau_s = \frac{n}{6} (0,36 + 0,22 \cdot \overline{S_p}) \exp \left[E_A \left(\frac{1}{RT} - \frac{1}{17190} \right) + \left(\frac{21,2}{p - 12,4} \right)^{0,63} \right] \quad (1)$$

Obliczenia przy jego zastosowaniu potwierdzają pełną zgodność wyników doświadczalnych. Wzór ten wyraża opóźnienie samozapłonu w zależności od temperatury sprężania T , ciśnienia p oraz prędkości obrotowej n silnika, gdzie:

- $\overline{S_p}$ – średnia prędkość tłoka w m/s,
- R – stała gazowa 8,3134 J/mol·K,
- E_A – pozorna energia aktywacji.

$$E_A = \frac{618,840}{LC + 25} \quad [\text{J/mol}] \quad (2)$$

gdzie: LC – liczba cetanowa.

Energia aktywacji maleje ze wzrostem liczby cetanowej.

Opóźnienie samozapłonu wyrażone w czasie określa wzór:

$$\tau_{id}' = \frac{\tau_{id}(\alpha^\circ \text{OWK})}{0,006 \cdot n} \quad [\text{ms}] \quad (3)$$

gdzie: n – prędkość obrotowa silnika w obr/min.

Wartości T i p mogą być szacowane poprzez przyjęcie politropowego procesu sprężania ze wzorów:

$$\begin{aligned} T_{TC} &= T_i \cdot r_c^{m-1} \\ p_{TC} &= p_i \cdot r_c^m \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie:

- m – wykładnik politropy sprężania,
- r_i – stopień sprężania,

a indeks dolny „ i ” oznacza różne parametry zasysanego powietrza. Wartości szczególne „ i ” podano w pracy [1].

W niniejszym artykule wykorzystano badania własne autora, w których kąt opóźnienia samozapłonu był określony z wykorzystaniem dwóch przebiegów: wzniosu iglicy $h_i = f(\alpha)$ oraz części wykresu indykatorowego $p_s = f(\alpha)$.

4. Niepowtarzalność parametrów roboczych silnika

Wskaźnik niepowtarzalności X wybranego parametru roboczego silnika Y można wyrazić za pomocą poniższej zależności:

$$X_Y = \frac{\sigma(Y)}{\bar{Y}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k [(Y)_i - \bar{Y}]^2}}{\bar{Y}} \cdot 100\% \quad (5)$$

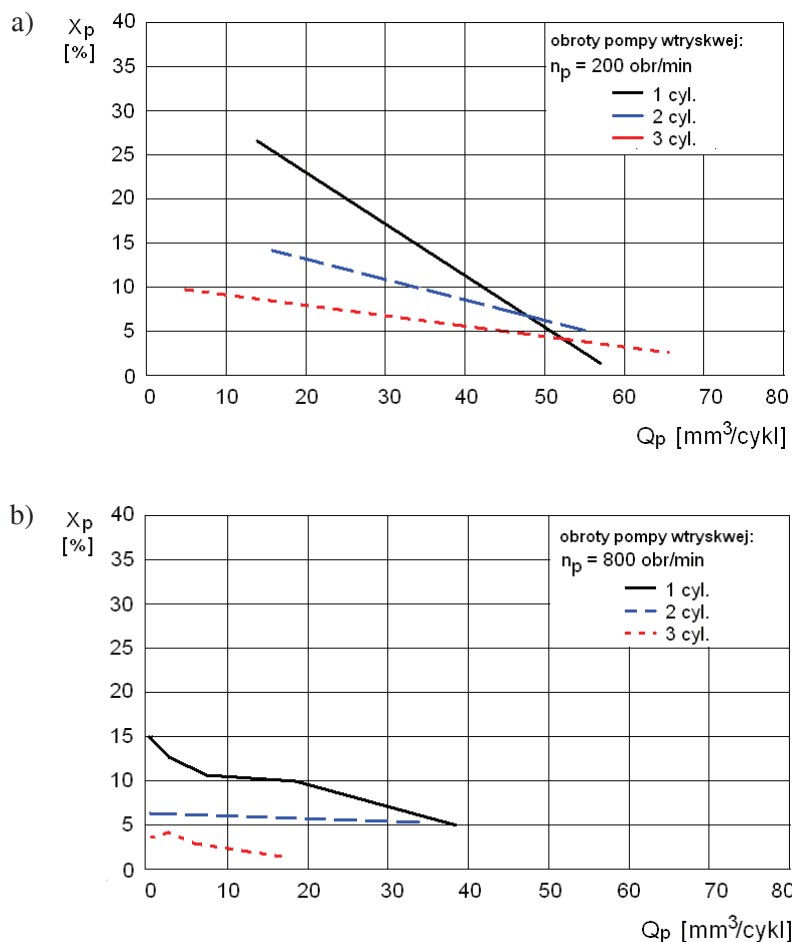
gdzie:

- $\sigma(Y)$ – odchylenie standardowe,
- Y – wartość parametru dla i -tego cyklu roboczego silnika,
- \bar{Y} – wartość średnia rozpatrywanego parametru,
- k – liczba rozpatrywanych cykli roboczych silnika.

Na niepowtarzalność różnych parametrów pracy silnika, takich jak: wznios iglicy rozpylacza, przebieg ciśnienia w cylindrze silnika oraz charakterystykę dawki paliwa, i innych, zdecydowany wpływ mają m.in. własności fizykochemiczne paliwa i nieustalone zjawiska jego przepływu w procesie tłoczenia w układzie wysokiego ciśnienia paliwa.

Niepowtarzalność wartości ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym podczas jego tłoczenia zależy głównie od:

- dawki podawanego paliwa,
- prędkości, z jaką paliwo jest przetłaczane (rys. 1) [9, 10].



Rys. 1. Wartości wskaźnika niepowtarzalności maksymalnego ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym X_p , dla różnej dawki paliwa pompy wtryskowej DPA-WSK-PZL 3238F150 przy prędkości: a) $n_p=200$ obr/min, b) $n_p=800$ obr/min.

Fig. 1. Values of unrepeatability coefficient of maximal fuel pressure in delivery pipe versus fuel dose of DPA-WSK-PZL injection pump calculated for rotational speed: a) $n_p=200$ rpm, b) $n_p=800$ rpm.

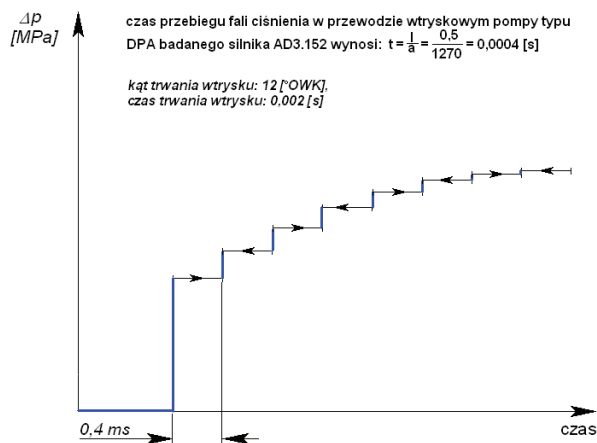
W fazie tłoczenia paliwa powstaje fala, która przemieszcza się w przewodzie wtryskowym, a po uderzeniu w iglicę odbija się od niej i wracając nakłada się w różny sposób na pierwotną falę ciśnienia paliwa. Według niektórych badaczy (R.Brum – SNCF Francja) ciśnienie wtrysku wzrasta skokowo (rys. 2) o amplitudzie czasowej równej długości przewodu wtryskowego podzielonej przez wartość prędkości rozchodzenia się dźwięku w paliwie:

$$p_A = \frac{l}{a} \quad [s] \quad (6)$$

gdzie:

- l – długość przewodu wtryskowego [m],
 a – prędkość rozchodzenia się dźwięku w paliwie w przewodzie wtryskowym [m/s].

i asymetrycznie uzyskuje wartość maksymalną ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym równą p_{\max} .



Rys. 2. Schemat przyrostu ciśnienia w przewodzie wtryskowym paliwa wg R. Brum (SNCF).

Fig. 2. Scheme of fuel pressure rise in delivery pipe according to R. Brum (SNCF).

Wartość wskaźnika niepewności kąta opóźnienia samozapłonu określa wzór:

$$X_{\alpha_{zs}} = \frac{\sigma(\alpha_{zs})}{\alpha_{zs}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k [(\alpha_{zs})_i - \overline{\alpha_{zs}}]^2}}{\overline{\alpha_{zs}}} \cdot 100\% \quad (7)$$

gdzie:

- $\sigma(\alpha_{zs})$ – odchylenie standardowe,
- α_{zs} – kąt opóźnienia samozapłonu,
- $\overline{\alpha_{zs}}$ – wartość średnia kąta opóźnienia samozapłonu,
- k – liczba kolejnych cykli.

Dla zjawiska przepływu paliwa w przewodzie wtryskowym powinno się uwzględnić gazową fazę jego przepływu z następującymi uproszczeniami:

- nie uwzględnia się wpływu na procesy hydrodynamiczne przepływu wytworzonych pęcherzy powietrza i par paliwa,
- w przestrzeniach nie zapełnionych paliwem ciśnienie jest równe zero,

- całe paliwo w przewodzie wtryskowym przed procesem jego wtrysku posiada wysokie ciśnienie rozłożone równomiernie na całej długości przewodu wtryskowego,
- w końcowej fazie wtrysku paliwa przy ciśnieniu resztkowym poniżej zera, objętość paliwa nad tłoczkiem i zaworem odcinającym paliwo oblicza się z bilansu objętości, a w przewodzie paliwowym niejednorodność strugi paliwa w końcu procesu wtrysku modeluje się podciśnieniami.

Przy dokonaniu szeregu takich założeń upraszczających wg badaczy rosyjskich można określić zmiany ciśnienia w przewodzie wtryskowym w warunkach niestabilnych z następujących zależności:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dx} + \rho_p \frac{dc}{dt} + 2\rho_p \cdot k \cdot c &= 0 \\ \frac{dc}{dx} + \frac{1}{a^2 \rho_p} \cdot \frac{dp}{dt} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

gdzie:

- x – długość strugi paliwa w czasie t ,
- t – czas,
- c – prędkość przepływu paliwa,
- a – prędkość rozchodzenia dźwięku w paliwie,
- ρ_p – gęstość paliwa,
- k – hydrauliczny współczynnik tarcia.

Niepowtarzalność zjawisk zachodzących podczas spalania paliwa określono w Uniwersytecie Technicznym MADI w Moskwie przy użyciu dwóch wskaźników i nazywano je „niestabilnością parametru” (w tym przypadku maksymalnych ciśnień spalania) [14]:

$$\begin{aligned} K_{p1} &= \left(\frac{\Delta p_{i \max}}{p_{i \text{śr}}} \right) \cdot 100\% \\ K_{p2} &= \frac{\sqrt{\sum \sigma_i^2}}{p_{i \text{śr}} \sqrt{(n-1)}} \cdot 100\% \end{aligned} \quad (9)$$

gdzie:

- $\Delta p_{i \max}$ – przedział zmian maksymalnych ciśnień w komorze spalania,
- $p_{i \text{śr}}$ – średnie ciśnienie spalania,
- σ_i – odchylenie standardowe,
- n – liczba badanych cykli.

Dla oceny badanych zjawisk analizuje się „niestabilność” maksymalnego ciśnienia w komorze spalania (K_{p1}) i „niestabilność” średniej wartości maksymalnej ciśnienia spalania (K_{p2}).

5. Charakterystyka badanych paliw

W badaniach zastosowano następujące rodzaje paliw: standardowy olej napędowy (ON), etanol (ET) o stężeniu 100%, eter etylo-tert-butylowy (EETB) oraz estry nienasyconych kwasów tłuszczowych (FAME). Wymienione paliwa wykorzystano w celu przygotowania następujących mieszanin paliwowych: ET20 oraz EETB20. Mieszanka o oznaczeniu ET20 zawierała: 70% ON, 20% ET oraz 10% emulgatora FAME.

W przypadku mieszaniny EETB20 zawierała ona: 80% ON i 20% EETB. Wszystkie podane proporcje odnoszą się do udziałów objętościowych dla poszczególnych paliw, które tworzyły mieszaninę. Wybrane własności fizykochemiczne badanych paliw przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wybrane własności fizykochemiczne badanych paliw.

Table 1. Selected properties of tested fuels.

Nazwa własności	Oznaczenie paliwa		
	ON	ET20	EETB20
Gęstość w temp. 15 °C [kg/m ³]	838	818	819
Lepkość kinematyczna w temp. 40 °C [mm/s ²]	3,49	3,08	2,99
Indeks cetanowy [-]	49,9	48,1	49,5
Wartość opałowa [MJ/kg]	43,2	40,1	41,7
Wartość opałowa [MJ/dm ³]	36,2	32,8	34,0
Odporność korozyjna	1	1	1

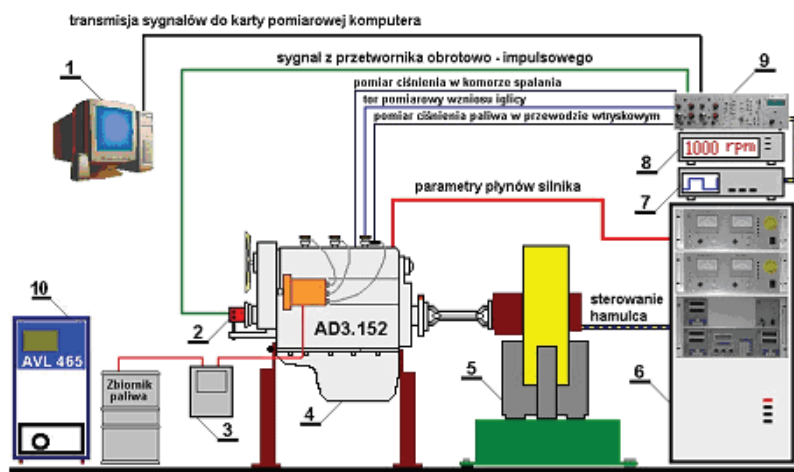
Zarówno etanol, jak i badany eter charakteryzują się wieloma niekorzystnymi własnościami w stosunku do ON, które utrudniają ich zastosowanie jako paliwa do silników o zapłonie samoczynnym. Dotyczy to szczególnie niskiej skłonności tych paliw do samozapłonu oraz ich niższej wartości opałowej i lepkości. Będzie to oddziaływać w kierunku zwiększenia jednostkowego zużycia paliwa oraz przecieków w aparaturze wtryskowej w procesie toczenia paliwa.

Różnice w gęstości tych paliw zamieszczonych w tabeli 1 mają również wpływ na parametry początku i końca tłoczenia paliwa i charakter zmian krzywych $h_i=f(\alpha)$, a także zmian ciśnienia w komorze spalania silnika, co pokazano na rysunkach 3, 5 i 7.

Konsekwencją różnic ciśnień występujących w komorze spalania silnika dla poszczególnych badanych, kolejnych cykli roboczych będzie również odmienność emisji składników spalin.

6. Charakterystyka wykonanych badań

Badania przeprowadzono w laboratorium Zakładu Technicznej Eksploatacji Pojazdów Politechniki Radomskiej. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego: 1 – komputer z kartą pomiarową KPCI 3110 Keithley, 2 – przetwornik obrotowo-impulsowy INTRON 4096, 3 – moduł pomiaru zużycia paliwa, silnik AD3.152, 5 – hamulec silnikowy, 6 – szafa kontrolna, 7 – generator podstawy czasu, 8 – moduł kontroli prędkości obrotowej silnika, 9 – wzmacniacz ładunku, 10 – analizator spalin.

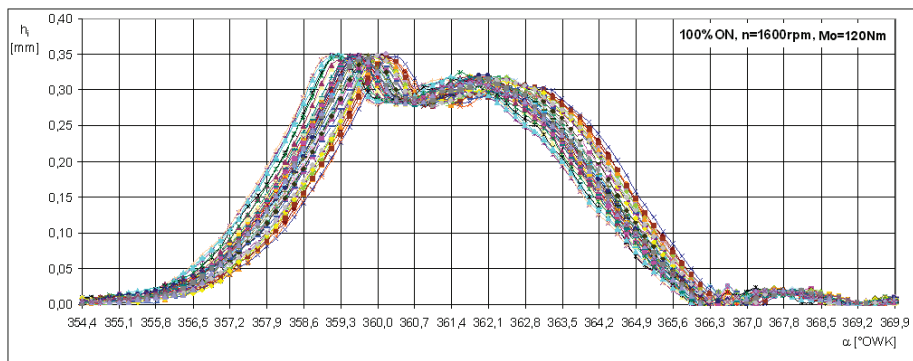
Fig. 3. Diagram of the test stand: 1 – PC with Keithley KPCI 3110 measurement card, 2 – INTRON 4096 transducer, 3 – fuel meter, 4 – AD3.152 engine, 5 – engine brake, 6 – engine control box, 7 – time base generator, 8 – engine speed control module, 9 – signals amplifier, 10 – AVL 465 diGas Analyzer.

Zmiany wartości wybranych parametrów roboczych badanego silnika wyznaczano na podstawie zarejestrowanych przebiegów zmian ciśnienia w komorze spalania, przewodzie wtryskowym oraz wzniosu iglicy rozpylacza. Umożliwiło to wyznaczenie następujących parametrów: kąta początku wtrysku, kąta początku spalania, kąta opóźnienia samozapłonu paliwa i wartości maksymalnego ciśnienia w komorze spalania oraz kąta trwania wtrysku.

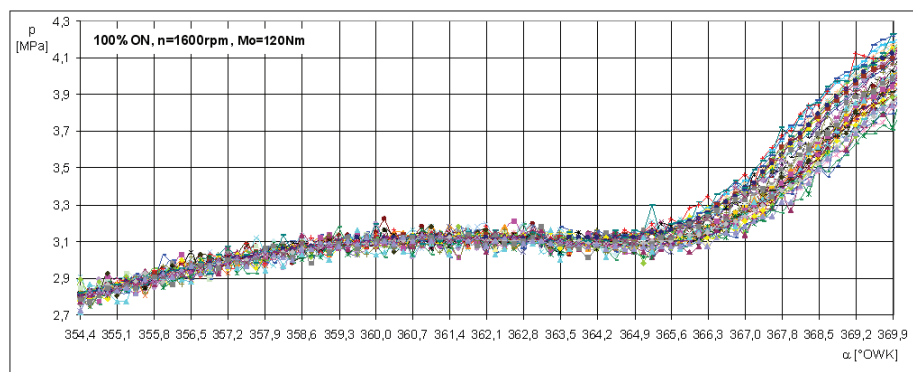
Pomiary wartości parametrów roboczych silnika zrealizowano w warunkach charakterystyki obciążeniowej silnika przy prędkości obrotowej wału korbowego $n=1600$ obr/min oraz momencie obrotowym $M_0=120$ Nm. W takich warunkach rejestrowano przebiegi kolejnych 50 cykli roboczych silnika. Dzięki zastosowaniu przetwornika obrotowo – impulsowego INTRON 4096 uzyskano rozdzielczość o wartości $0,176^\circ\text{OWK}$ dla każdego punktu pomiarowego.

7. Wyniki badań

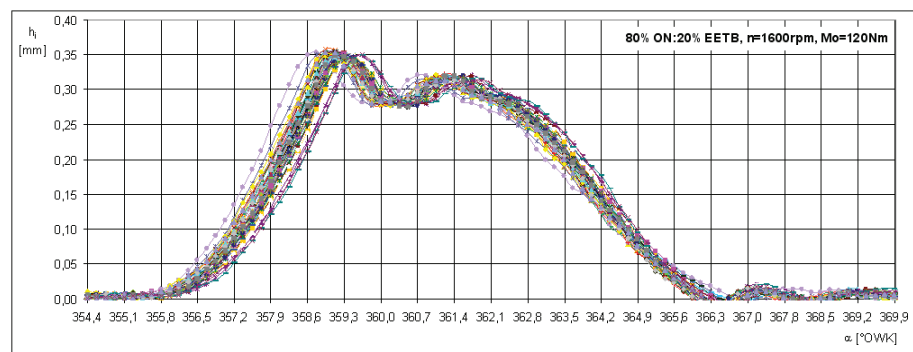
Na rysunkach 4 – 9 pokazano zarejestrowane przebiegi zmian wzniosu iglicy rozpylacza oraz ciśnienia w komorze spalania silnika AD31.152 zasilanego badanymi paliwami.



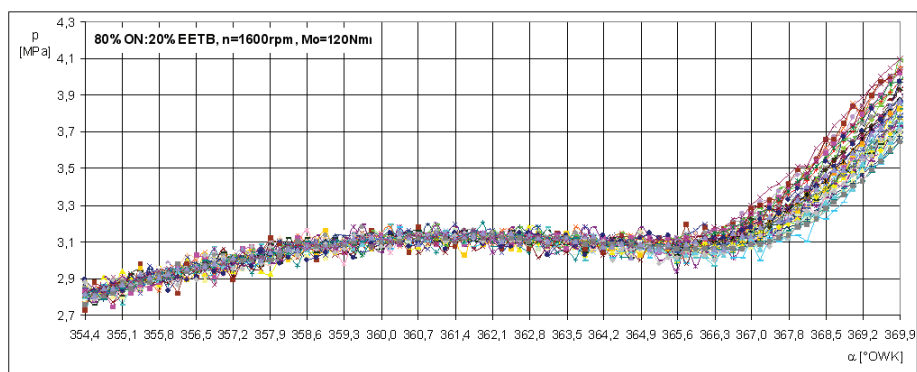
Rys. 4. Przebiegi zmian wzniosu iglicy rozpylacza silnika AD3.152 zasilanego ON.
Fig. 4. Courses of needle lift of AD3.152 engine fuelled with ON.



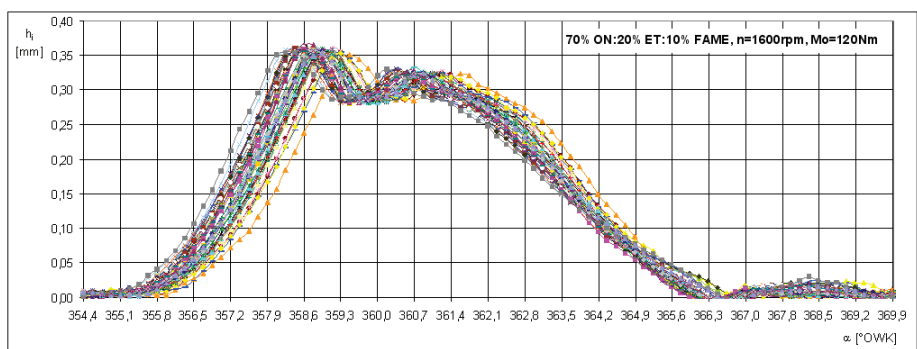
Rys. 5. Przebiegi początku zmian ciśnienia w komorze spalania silnika AD3.152 zasilanego ON.
Fig. 5. Courses of pressure in combustion chamber of AD3.152 engine fuelled with ON.



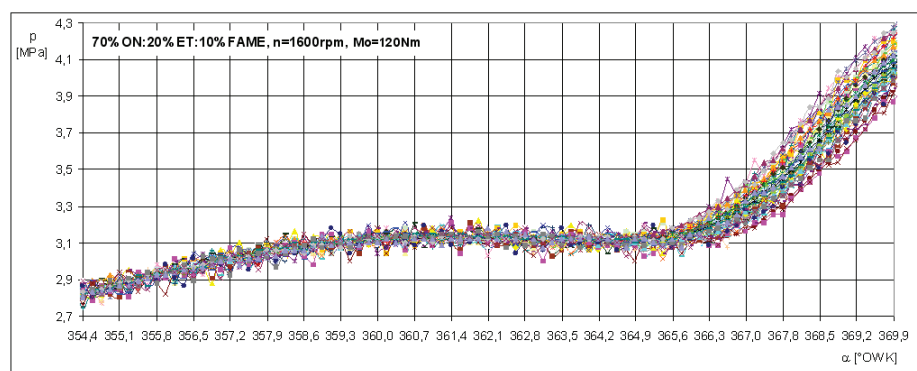
Rys. 6. Przebiegi zmian wzniosu iglicy rozpylacza silnika AD3.152 zasilanego paliwem EETB20.
Fig. 6. Courses of needle lift of AD3.152 engine fuelled with EETB20.



Rys. 7. Przebiegi początku zmian ciśnienia w komorze spalania silnika AD3.152 zasilanego EETB20.
Fig. 7. Courses of pressure in combustion chamber of AD3.152 engine fuelled with EETB20.



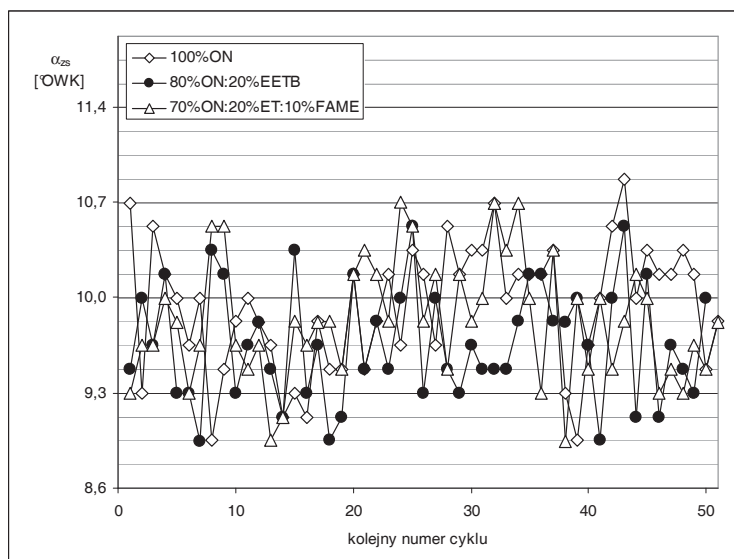
Rys. 8. Przebiegi zmian wzniosu iglicy rozpylacza silnika AD3.152 zasilanego paliwem ET20.
Fig. 8. Courses of needle lift of AD3.152 engine fuelled with ET20.



Rys. 9. Przebiegi początku zmian ciśnienia w komorze spalania silnika AD3.152 zasilanego ET20.
Fig. 9. Courses of pressure in combustion chamber of AD3.152 engine fuelled with ET20.

Na powyższych rysunkach przedstawiono 50 kolejnych cykli roboczych badanego silnika. Zbiór tych informacji byłby bardziej przejrzysty, gdyby poszczególne krzywe mogły być wydrukowane w różnych kolorach.

Przebiegi pokazane na rysunkach 4 – 9 umożliwiły wyznaczenie wartości kątów opóźnienia samozapłonów w kolejnych cyklach roboczych silnika AD3.152 zasilanego badanymi mieszaninami paliwowymi. Uzyskane wartości pokazano na rysunku 10, oraz zestawiono w tabelach 2 - 4.



Rys. 10. Wartości kąta opóźnienia samozapłonu badanych paliw wyznaczone dla silnika AD3.152 przy $n=1600$ obr/min i obciążeniu $M_0=120$ Nm.

Fig. 10. Values of self-ignition angles calculated for tested fuels for AD3.152 engine at $n=1600$ rpm and torque $M_0=120$ Nm.

Tabela 2. Wartości α_{zs} wyznaczone dla silnika AD3.152 zasilanego paliwem ON.

Table 2. Values of α_{zs} calculated for AD3.152 engine fuelled with ON.

L.p.	α_{zs}	L.p.	α_{zs}	L.p.	α_{zs}	L.p.	α_{zs}	L.p.	α_{zs}
1.	10,722	11.	10,020	21.	9,492	31.	10,371	41.	10,019
2.	9,317	12.	9,843	22.	9,844	32.	10,723	42.	10,547
3.	10,547	13.	9,668	23.	10,195	33.	10,019	43.	10,899
4.	10,195	14.	9,141	24.	9,668	34.	10,195	44.	10,019
5.	10,019	15.	9,316	25.	10,371	35.	10,195	45.	10,371
6.	9,668	16.	9,141	26.	10,195	36.	10,195	46.	10,195
7.	10,019	17.	9,844	27.	9,668	37.	10,371	47.	10,195
8.	8,965	18.	9,492	28.	10,547	38.	9,316	48.	10,371
9.	9,492	19.	9,493	29.	10,195	39.	8,965	49.	10,195
10.	9,843	20.	10,196	30.	10,371	40.	9,668	50.	9,492

Dla danych zawartych w tabeli 2 wartość wskaźnika niepewności $X\alpha_{zs}$ kąta opóźnienia samozapłonu wynosiła 4,73% dla oleju napędowego.

Tabela 3. Wartości α_{zs} wyznaczone dla silnika AD3.152 zasilanego paliwem EETB20.Table 3. Values of α_{zs} calculated for AD3.152 engine fuelled with EETB20.

L.p.	α_{zs}	L.p.	α_{zs}	L.p.	α_{zs}	L.p.	α_{zs}	L.p.	α_{zs}
1.	9,491	11.	9,668	21.	9,492	31.	9,491	41.	8,965
2.	10,018	12.	9,843	22.	9,844	32.	9,491	42.	10,018
3.	9,668	13.	9,492	23.	9,492	33.	9,492	43.	10,547
4.	10,196	14.	9,139	24.	10,020	34.	9,844	44.	9,140
5.	9,316	15.	10,371	25.	10,545	35.	10,195	45.	10,195
6.	9,315	16.	9,316	26.	9,317	36.	10,195	46.	9,141
7.	8,963	17.	9,668	27.	10,019	37.	9,844	47.	9,668
8.	10,370	18.	8,965	28.	9,492	38.	9,843	48.	9,491
9.	10,196	19.	9,140	29.	9,316	39.	10,018	49.	9,316
10.	9,316	20.	10,196	30.	9,668	40.	9,666	50.	10,019

Dla danych zawartych w tabeli 3 wartość wskaźnika niepowtarzalności $X\alpha_{zs}$ kąta opóźnienia samozapłonu wynosiła 4,38% dla paliwa EETB20.

Tabela 4. Wartości α_{zs} wyznaczone dla silnika AD3.152 zasilanego paliwem ET20.Table 4. Values of α_{zs} calculated for AD3.152 engine fuelled with ET20.

L.p.	α_{zs}	L.p.	α_{zs}	L.p.	α_{zs}	L.p.	α_{zs}	L.p.	α_{zs}
1.	9,315	11.	9,491	21.	10,371	31.	10,020	41.	10,020
2.	9,668	12.	9,666	22.	10,195	32.	10,722	42.	9,492
3.	9,668	13.	8,963	23.	9,843	33.	10,371	43.	9,844
4.	10,020	14.	9,141	24.	10,723	34.	10,722	44.	10,195
5.	9,842	15.	9,843	25.	10,547	35.	10,019	45.	10,018
6.	9,315	16.	9,668	26.	9,844	36.	9,315	46.	9,315
7.	9,668	17.	9,842	27.	10,195	37.	10,371	47.	9,492
8.	10,546	18.	9,844	28.	9,492	38.	8,963	48.	9,317
9.	10,547	19.	9,493	29.	10,195	39.	10,018	49.	9,668
10.	9,666	20.	10,195	30.	9,844	40.	9,492	50.	9,492

Dla danych zawartych w tabeli 4 wartość wskaźnika niepowtarzalności $X\alpha_{zs}$ kąta opóźnienia samozapłonu wynosiła 4,57% dla ET20.

Wyniki przedstawione na rysunku 8 oraz zawarte w tabelach 2 – 4 pokazują, że zmiana wartości kąta opóźnienia samozapłonu badanych paliw zawierała się w przedziale dla oleju napędowego: 8,965 do 10,019 [°OWK]. Natomiast dla paliw EETB20 i ET20 były to wartości odpowiednio w przedziałach: 8,963 – 10,370 oraz 8,963 – 10,722.

Dla ON, który charakteryzował się największą lepkością $\eta_k=3,49$ [mm/s²] przedział zmian wartości kątów opóźnienia samozapłonu zawierał się w granicach najmniejszych. Dla pozostałych paliw o mniejszej ich lepkości uzyskano nieznacznie większy przedział zmian wartości kątów opóźnienia samozapłonu wyrażony w stopniach obrotu wału korbowego silnika.

Uzyskane przebiegi wzniosu iglicy oraz początku narastania ciśnienia w komorze spalania badanego silnika przedstawiono w postaci rysunków 4 - 9 celem pokazania charakteru jakościowego ich zmian, natomiast dla pełnej czytelności zmiany ilościowe badanego parametru zawarto w tabelach 2 – 4 oraz pokazano na rysunku 10.

8. Podsumowanie

Niepowtarzalność parametrów procesu wtrysku paliwa wpływa na przebieg jego spalania w silniku.

Poza oddziaływaniem na parametry konstrukcyjne systemów zasilania silnika i komory spalania przez producenta silnika, w warunkach eksploatacji możliwe jest jedynie oddziaływanie na temperaturę paliwa poprzez zastosowanie systemu jego chłodzenia. W aspekcie rozważanych zagadnień istotnym jest, aby paliwo zasilające silnik charakteryzowało się względnie stałymi parametrami fizykochemicznymi i możliwie niezmienną temperaturą.

Niepowtarzalność początku wtrysku paliwa w kolejnych cyklach wtrysku wyraźnie wpływa na niepowtarzalność kąta opóźnienia samozapłonu i wartości parametrów cyklu roboczego silnika (wykres indykatorowy). W ostateczności zmiany kąta opóźnienia samozapłonu paliwa występujące w kolejnych cyklach roboczych mogą mieć niekorzystny wpływ na zachowanie odpowiedniej równomierności prędkości obrotowej wału korbowego silnika.

W analizie uzyskanych wyników badań dotyczących niepowtarzalności kąta opóźnienia samozapłonu należy brać pod uwagę to, że wraz ze wzrostem udziału paliwa roślinnego w mieszaninie z ON obserwuje się: zmniejszenie kąta opóźnienia samozapłonu w °OWK [13], a także różne skłonności badanych paliw do ich samozapłonu (różne liczby cetanowe). Estry metylowe nienasyconych kwasów tłuszczowych (FAME) charakteryzują się krótszym okresem opóźnienia samozapłonu w stosunku do oleju napędowego [13].

Literatura

- [1] HARDENBERG H.O., HASE W.F.: *An empirical formula for computing the pressure rise delay of a fuel from its cetane number and from the relevant parameters of direct injection diesel engines*. SAE Paper 790493. SAE Trans. Vol. 88, 1979.
- [2] HEYWOOD J.B.: *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw – Hill Book Company, New York 1998.
- [3] KOWALEWICZ A., LOTKO W.: *Performances and same combustion characteristics of C.I. engines fuelled with rape oil and its ester*. CIMAC. Interlaken, Swissair 1995.
- [4] LOTKO W.: *Zagadnienia niepowtarzalności parametrów pracy aparatury wtryskowej*. Monografia nr 10/1993. Wyższa Szkoła Inżynierska. Radom 1993.
- [5] LOTKO W.: *Dawka paliwa a parametry wtrysku pompy rozdzielaczowej*. Zeszyt nr 15, PAN, KONMOT 1998, Politechnika Krakowska 1998.
- [6] LOTKO W.: *Studium diagnozowania pompy wtryskowej rozdzielaczowej w oparciu o wskaźnik niepowtarzalności ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, 1998, Zeszyt 3/98.
- [7] LOTKO W.: *Comparative study on fuel injection process of vegetable and hydrocarbon fuels*. Archiwum Motoryzacji 1998, Nr 1-2.

- [8] LOTKO W., LONGWIC R.: *Analiza wpływu sztywności sprężyn zaworów tłocznych pompy wtryskowej na wybrane parametry procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym*. Archiwum Motoryzacji 2001, Nr 4.
- [9] LOTKO W.: *Wpływ czynników eksploatacyjnych i własności paliwa na proces tłoczenia i spalania w silniku wysokoprężnym*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn 1998, Zeszyt 3/98.
- [10] LOTKO W.: *Niepowtarzalność ciśnień szybkozmiennych w silniku wysokoprężnym*. Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej. Szczecin 1998.
- [11] LOTKO W.: *Wpływ procesu docierania pompy wtryskowej na wskaźnik niepowtarzalności ciśnienia wtrysku paliwa*. EKSPLO-SIL '92, Wyższa Szkoła Morska, Gdynia 1992.
- [12] LOTKO W.: *Wskaźnik niepowtarzalności ciśnienia wtrysku a własności fizykochemiczne paliwa*. Silniki Spalinowe 1992, nr 3-4.
- [13] LOTKO W.: *Opóźnienie samozapłonu paliw roślinnych w silniku z wtryskiem bezpośrednim*. Politechnika Krakowska, PAN, Monografia Nr 20/1996.
- [14] ЛЬОМКО В., ЛУКАНИН В.Н., ХАЧИЯН А. С.: *Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания*. МТАДИ, МОСКВА 2000.

Unrepeatability of fuel self-ignition delay in diesel engine

S u m m a r y

The paper presents test results carried out with using of AD3.152 diesel engine fuelled with diesel oil and two other kinds of fuel blends: diesel – ethyl tertiary butyl ether (EETB) and diesel–anhydrous ethanol with addition of fatty acid methyl ester. The main aim of this paper was to describe selected problems of fuel self-ignition unrepeatability phenomenon of tested diesel engine fuelled with the above mentioned fuel blends.