



KONCEPCJA OCENY JAKOŚCI ROZPYLANIA PALIWA W KOMORACH SPALANIA Z WTRYSIEM BEZPOŚREDNIM SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

Jerzy Girtler

*Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Zakład Siłowni Okrętowych
e-mail: jgirtl@pg.edu.pl*

Streszczenie

Przedstawiono wstępną propozycję oceny jakości rozpylania paliwa w komorach spalania z wtryskiem bezpośrednim silnika o zapłonie samoczynnym. Podano definicję opisową i wartościującą pojęcia jakości spalania. W odniesieniu do definicji wartościującej przyjęto, że jakość rozpylania paliwa może być określona za pomocą zbioru takich cech jak: dokładność rozpylania, stopień rozpylenia, jednorodność rozpylenia, zasięg strumienia, rozrzut kropel strumienia, równomierność rozpylenia, stężenie rdzenia strumienia paliwa i szerokość (średnica) tego strumienia. Wymienione cechy jakości rozpylania zostały scharakteryzowane w ujęciu deterministycznym i probabilistycznym za pomocą odpowiednich wzorów. Wykazano przy tym przydatność zarówno estymacji punktowej jak i przedziałowej do oceny cech jakości rozpylania paliwa. Zwrócono przy tym uwagę, że estymacja przedziałowa umożliwia pełniejszy (lepszy) opis jakości rozpylania paliwa.

Słowa kluczowe: *jakość rozpylania paliwa, komora spalania silnika o zapłonie samoczynnym, proces spalania, silnik o zapłonie samoczynnym, wtrysk bezpośredni paliwa do cylindra*

1. Wstęp

Przebieg procesu spalania, podczas którego następuje przekształcenie w formie ciepła (na sposób ciepła) energii chemicznej zawartej w paliwie na energię wewnętrzną powstających wtedy gazów spalinowych (spalin), w każdej przestrzeni roboczej (cylindrze) dowolnego silnika o zapłonie samoczynnym, ma bezpośredni wpływ na średnie ciśnienie indykowane (p_i) w poszczególnych jego cylindrach i tym samym na sprawność ogólną tego rodzaju silnika. Przebieg tego procesu ma także istotny wpływ na niezawodność i trwałość takiego silnika, zwłaszcza jego zespołów tłokowo-cylindrowych oraz łożysk głównych i korbowych, a wobec tego na jego przydatność eksploatacyjną [5, 6, 7, 8]. Dotyczy to zwłaszcza silników o zapłonie samoczynnym z komorą o wtrysku bezpośrednim [17, 18, 22, 23].

Przebieg wspomnianego procesu zależy od wielu czynników a przede wszystkim od: przebiegu wtrysku, zawirowania świeżego ładunku (mieszanki świeżego powietrza i reszty spalin pozostających w cylindrze z poprzedniego obiegu) zawartego w komorze spalania i jakości rozpylenia (rozpylania) paliwa a tym samym od przebiegu procesu tworzenia w komorze spalania mieszanki palnej powstającej z paliwa wtrysniętego do komory spalania i świeżego ładunku zawartego w tej komorze [1, 2, 3, 10, 11, 13, 14, 15, 19, 20].

Najistotniejszy wpływ na tworzenie się w komorze spalania silnika mieszanki palnej o prawidłowej makro-i mikrostrukturze, tym samym na czas opóźnienia samozapłonu i przebieg procesu spalania ma jakość rozpylenia paliwa. Z tego też względu należy dążyć do jak najdokładniejszego określenia (oceny) jakości rozpylenia paliwa w poszczególnych komorach spalania nie tylko z wtryskiem bezpośrednim.

W literaturze dotyczącej spalania paliwa w silnikach o zapłonie samoczynnym [17, 18, 22, 23] jakość rozpylenia jest utożsamiana z takimi cechami jak: dokładność i jednorodność rozpylenia, a niekiedy także z długością strugi paliwa i kątem jego rozpylenia. Można jednak jakość rozpylenia paliwa rozumieć szerzej, a mianowicie jako zbiór cech rozpylonego paliwa wśród których powinny być także uwzględnione wymienione cechy. Zatem uzasadniona jest potrzeba podjęcia próby sprecyzowania pojęcia jakości rozpylenia paliwa w komorze spalania silnika o zapłonie samoczynnym i ustalenia wskaźników określających tę jakość. W tym artykule została więc podjęta próba kompleksowego ujęcia tego problemu, co wymaga najpierw scharakteryzowania zagadnienia rozpylenia paliwa w komorach spalania silnika o zapłonie samoczynnym a następnie wskaźników jakości rozpylenia paliwa w ujęciu probabilistycznym.

2. Rozpylenie paliwa w komorach spalania silnika o zapłonie samoczynnym

Strumień paliwa wtrysniętego do komory spalania z wtryskiem bezpośrednim ulega różnorodnemu (w czasie i przestrzeni) rozpyleniu. Kształt i struktura strumienia rozpylanego paliwa zależy przede wszystkim od początkowych sił wymuszających wtrysk paliwa i związanej z nimi prędkości jego wypływu z rozpylacza (końcówki) wtryskiwacza, ale także od lepkości, napięcia powierzchniowego, ściśliwości i zawartych w paliwie pęcherzyków powietrza oraz gęstości świeżego ładunku w cylindrze i aerodynamicznych oporów powietrza, jakie pokonuje paliwo podczas wtrysku [17, 22].

Paliwo wtrysnięte do komory spalania powinno utworzyć w niej mieszaninę paliwowo-powietrzną o wymaganej (najlepiej optymalnej) mikro-i makrostrukturze. Mieszaninę palną powinna cechować równomierna makrostruktura i drobna mikrostruktura [17, 18, 22, 23].

Równomierna makrostruktura mieszanki palnej jest wtedy, gdy paliwo rozproszony jest w świeżym ładunku tak, że każda jednostka objętości tego ładunku zawiera jednakową ilość paliwa. Natomiast drobna mikrostruktura jest wtedy, gdy po rozpyleniu paliwa w komorze spalania silnika, krople paliwa mają możliwie małą i jednakową średnicę (najlepiej optymalną).

Warunkiem uzyskania wymaganej mikrostruktury jest właściwe rozpylenie paliwa a makrostruktury – dodatkowo: prawidłowe wymieszanie paliwa z powietrzem oraz dostosowanie kształtu wtryskiwanego strumienia paliwa do ukształtowania komory spalania.

Strumień wtryskiwanego paliwa jest aktualnie charakteryzowany następującymi wielkościami: zasięgiem i kątem wierzchołkowym stożka tego strumienia oraz dokładnością i jednorodnością rozpylenia [17, 18, 22, 23]. Wielkości te mogą być uznane za składowe określające jakość rozpylenia paliwa. Ze względu na to, że wielkości te są zmiennymi losowymi, do oceny jakości rozpylenia paliwa niezbędne są wskaźniki probabilistyczne.

3. Wskaźniki jakości rozpylania paliwa

Mieszanina palna powinna charakteryzować się równomierną makrostrukturą i drobną mikrostrukturą. Umożliwia to uzyskanie spalania całkowitego i zupełnego. Spalanie takie stanowi warunek konieczny uzyskania maksymalnej sprawności ogólnej silnika. Wobec tego w ujęciu opisowym jakość rozpylania paliwa może być określona następująco: **jakość rozpylania (rozpylenia) paliwa wtrysniętego do komory spalania jest to (w sensie opisowym) właściwość rozpylonego paliwa charakteryzująca jego przysposobienie do całkowitego i zupełnego spalania w przestrzeni roboczej (cylindrze) silnika.**

Przysposobienie paliwa należy rozumieć jako „uczynienie go odpowiednim, bądź przygotowanie go do czegoś” [24], w tym przypadku – do pełnego (całkowitego i zupełnego) spalania w przestrzeni roboczej silnika o zapłonie samoczynnym. A zatem przysposobienie paliwa do spalania charakteryzuje jakość jego rozpylania.

Definicja opisowa jakości rozpylania paliwa zawiera opis tego zjawiska a zarazem zdarzenia jeśli to zjawisko zostanie odwzorowane w czasoprzestrzeni. Aby ocenić to zjawisko (zdarzenie – w przypadku zajścia tego zjawiska i odwzorowania go w czasoprzestrzeni) potrzebna jest definicja wartościująca, która może być sformułowana następująco: **jakość rozpylania paliwa wtrysniętego do komory spalania silnika o zapłonie samoczynnym jest to zbiór wskaźników określających stopień jego przysposobienia do całkowitego i zupełnego spalania w jego cylindrze (przestrzeni roboczej).**

Jakość rozpylania (JR) paliwa może być rozumiana (w sensie opisowym) jako właściwość, którą można opisać zbiorem następujących cech:

$$JR = \{DR, SR, JP, ZS, RK, RZ, SN, SS\} \quad (1)$$

gdzie:

JR – jakość rozpylania, DR – dokładność rozpylania, SR – stopień rozpylenia, JP – jednorodność rozpylenia, ZS – zasięg strumienia, RK – rozrzut kropel strumienia, RZ – równomierność rozpylenia, SN – stężenie rdzenia, SS – szerokość (średnica) strumienia,

przy czym:

DR : $d_{opt}, \Delta d, \Delta \bar{d}$; SR : $E(D) = \bar{d}, \Delta d_{max}, (\underline{d}, \bar{d})_{\beta}$; JP : $\nu, \sigma = \sigma^*, (\underline{\sigma}, \bar{\sigma})_{\beta}$;
 ZS : $E(L)$; RK : $E(B), E(R)$; RZ : $E(Z)$; SN : $E(N)$; SS : $E(S)$,

gdzie:

d_{opt} – optymalna średnica kropli paliwa,

$\Delta d, \Delta \bar{d}, \Delta d_{max}$ – różnice średnic określone wzorami (3), (4) i (13),

\bar{d} – wartość średnia (arytmetyczna) kropli paliwa, wzór (5)

$E(D)$ – wartość oczekiwana średnicy kropli paliwa, wzory (14) i (16),

D – zmienna losowa oznaczająca średnicę kropli paliwa,

ν – współczynnik zmienności określony wzorem (8),

σ^* – odchylenie standardowe zmiennej losowej D , wzór (7) i (15)

$E(L)$ – wartość oczekiwana długości strumienia,

L – zmienna losowa oznaczająca długość strumienia,

$E(B)$ – wartość oczekiwana kąta wierzchołkowego (kąta rozpylenia) poszczególnych strug strumienia paliwa,

B – zmienna losowa oznaczająca kąt wierzchołkowy poszczególnych strug strumienia paliwa,

$E(R)$ – wartość oczekiwana promienia strumienia mierzonego w określonej odległości od wylotu z otworu rozpylacza,

R – zmienna losowa oznaczająca promień strumienia mierzonego w określonej odległości od wylotu z otworu rozpylacza,

$E(Z)$ – wartość oczekiwana wskaźnika równomierności rozpylania paliwa,

Z – zmienna losowa oznaczająca wskaźnik równomierności rozpylania paliwa,

$E(N)$ – wartość oczekiwana wskaźnika stężenia rdzenia strumienia paliwa,

N – zmienna losowa oznaczająca wskaźnik stężenia rdzenia strumienia paliwa,

$E(S)$ – wartość oczekiwana średnicy (szerokości) strumienia paliwa rozpylonego przez rozpylacz wielootworowy,

S – zmienna losowa oznaczająca średnice (szerokość) strumienia paliwa rozpylonego przez rozpylacz wielootworowy.

Zasięg strumienia (ZS) i rozrzut kropli strumienia (RK) charakteryzują kształt strumienia paliwa, którego uproszczony schemat jest przedstawiony w wielu publikacjach, na przykład [17, 18, 22].

Wobec tego można rozpatrywać następujący zbiór wskaźników jakości rozpylenia paliwa:

$$W_{JR} = \left\{ \begin{array}{l} d_{opt}, \Delta d, \Delta \bar{d}; E(D), \Delta d_{max}, (\underline{d}, \bar{d})_{\beta}, v, (\underline{\sigma}, \bar{\sigma})_{\beta}, \\ E(L); E(B), E(R), E(Z), E(N), E(S) \end{array} \right\} \quad (2)$$

Do najistotniejszych składowych jakości rozpylenia paliwa (JR) należy zaliczyć dokładność rozpylenia (DR), stopień rozpylenia (SR) i jednorodność rozpylenia (JP). Składowe te są cechami (własnościami) strumienia (strugi) paliwa mającymi naturę losową. Wobec tego ocena tych składowych jakości rozpylenia (JR) powinna być dokonywana z uwzględnieniem rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej.

A. Dokładność rozpylenia oleju napędowego

Dokładność rozpylenia paliwa (DR) określana jest średnicą kropli tego paliwa. Średnica ta jest różna dla poszczególnych typów silników o zapłonie samoczynnym. Dla każdego typu silnika można ustalić optymalną średnicę kropli paliwa (d_{opt}) [17, 22]. Średnica ta nie może być zbyt duża, ponieważ nie zdąży odparować w wymaganym czasie i jej składniki palne mogą tylko częściowo ulec utlenieniu i zawierać CO bądź też w ogóle nie wejść w reakcję z tlenem. Z kolei zbyt mała średnica utrudnia przebieg spalania w cylindrze, ponieważ gwałtownie odparowując, powoduje natychmiastowe spalanie paliwa, co objawia się nadmierną wartością współczynnika narastania ciśnienia ($\varphi_p = dp/d\alpha$). Objawia się to szybkim narastaniem ciśnienia w tym cylindrze wskutek czego pojawia się nadmierne obciążenie silnika, zwłaszcza jego układu korbowego. W rezultacie może dojść do znacznego obniżenia niezawodności i trwałości tych łożysk. Powszechnie przyjmuje się, że gdy φ_p przekroczy wartość $0,7 \div 1,0$ [MPa/1° OWK], praca silnika staje się twarda, a więc silnik pracuje głośno, słychać charakterystyczne (metaliczne) stuki (stan ten nazywany jest młotowaniem silnika). Praca taka ma miejsce w okresie wybuchowego spalania. Podstawowym czynnikiem wpływającym na wartość φ_p jest zwłoka zapłonu.

Dokładność rozpylenia byłaby najlepsza wtedy, gdyby wszystkie krople paliwa rozpylonego w komorze spalania miały średnicę optymalną (d_{opt}). W praktyce osiągnięcie takiego rozpylenia paliwa jest niemożliwe. Zatem istotna jest informacja umożliwiająca ocenę różnicy między rozpyleniem optymalnym (gdy wszystkie krople mają średnicę d_{opt}) a rzeczywistym, zachodzącym w komorze spalania silnika. Informacja taka może być łatwo

opracowana w przypadku wykorzystania przestrzeni metrycznej [3]. Umożliwia ona analizowanie dokładności rozpylania paliwa na podstawie następujących wzorów:

$$\Delta d_{opt} = \max |d_{opt} - d| \quad (3)$$

gdzie:

- Δd_{opt} – różnica (odległość w przestrzeni metrycznej) między wartością średnic d_{opt} a d ,
- d_{opt} – optymalna średnica kropli paliwa dla danego typu silnika spalinowego,
- d – rzeczywista średnica kropli paliwa wtrysniętego do komory spalania lub innej przestrzeni, w której panują podobne warunki jak we wspomnianej komorze.

Zależność (3) określa maksymalną różnicę między średnicami d_{opt} oraz d . Z badań wynika, że średnice kropli paliwa rozpylonego przez wtryskiwacz są znacznie zróżnicowane [22]. Wobec tego, dla uproszczenia badań, można do oceny dokładności rozpylania zamiast wzoru (3) zastosować następujący wzór:

$$\Delta \bar{d} = |d_{opt} - \bar{d}| \quad (4)$$

gdzie:

- d_{opt} – oznaczenie takie same jak we wzorze (3),
- \bar{d} – wartość średnia (arytmetyczna) uzyskana z pomiarów wszystkich kropli o średnicach d_i ($i = 1, 2, \dots, n$).

Wartość średnią \bar{d} określa się (jak wiadomo) z następującego wzoru [4, 9, 12, 21]:

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (5)$$

Średni rozmiar kropli określa stopień rozpylenia paliwa. Dokładność rozpylania (DR), która zależy od \bar{d} , wpływa istotnie na jednorodność rozpylania paliwa (JP).

Wielkość kropli paliwa wtrysniętego do komory spalania i jednorodność mieszaniny paliwowo-powietrznej ma zasadniczy wpływ na skłonność paliwa do samozapłonu, a zatem również na czas zwłoki zapłonu. Paliwo powinno więc być odpowiednio rozpylone. Krople nie mogą być ani zbyt duże ani też zbyt małe. W obu przypadkach takie krople uniemożliwiają uzyskanie prawidłowego przebiegu procesu spalania paliwa. Małe krople cechuje bardzo duży stosunek powierzchni do objętości. Wskutek tego parują bardzo szybko, co w rezultacie powoduje w wyniku intensywnej dyfuzji oraz dużego nadmiaru powietrza w komorze spalania tworzenie się ubogiej mieszanki o bardzo wysokiej temperaturze. Najniższą temperaturę samozapłonu ma mieszanina palna, której skład odpowiada w przybliżeniu składowi stechiometrycznemu, czyli wtedy, gdy współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1$. Natomiast duże krople nie zdążą odparować a wskutek tego zachodzą znaczne straty energetyczne związane z niezupełnym i niecałkowitym spalaniem paliwa.

Z przedstawionych powodów istotne jest również należyte określenie jednorodności rozpylenia paliwa wtryskiwanego do komór spalania silników o zapłonie samoczynnym.

B. Jednorodność rozpylenia paliwa

Jednorodność rozpylenia paliwa oceniana jest ilością kropli o jednakowej średnicy [22]. Z uwagi na to, że średnica D kropli paliwa wtrysniętego do komory spalania jest zmienną

losową, zatem jej realizacje cechuje określone rozproszenie. Miarą rozproszenia (dyspersji) oznaczanego jako „D” zmiennej losowej D (średnicy kropli) jest wariancja $D^2(D)$, określana również symbolem σ^2 . Wariancja $D^2(D)$ jest momentem centralnym II-rzędu zmiennej losowej D , a więc $D^2(D) = E(D^2) - E^2(D)$.

Więszemu rozproszeniu zmiennej losowej D odpowiada większa jej wariancja. Wariancja, jak już wspomniano, równa się średniej kwadratów odchyłeń poszczególnych wartości zmiennej D od średniej tych wartości i może być oszacowana w formie wartości odpowiedniej statystyki σ^{*2} , zatem [4, 12, 21], czyli

$$D^2(D) = \sigma^{*2}(D) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2 \quad (6)$$

Dodatni pierwiastek z wariancji, nazywany odchyleniem standardowym (średnim), może być również uznany za miarę rozrzutu zmiennej losowej D , przydatną do oceny jednorodności rozpylenia paliwa, czyli wielkość

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \quad (7)$$

Za miarę jednorodności rozpylenia paliwa może być także uznany współczynnik zmienności ν , który może być określony w formie następującej zależności [4]:

$$\nu = \frac{\sigma}{E(D)} \quad (8)$$

Wobec tego jednorodność rozpylenia (JP) paliwa może być oceniana na podstawie takich wielkości jak: σ^2 , σ oraz ν .

Przy rozpatrywaniu dokładności rozpylenia stwierdzone zostało, że średnica D kropli paliwa wtrysniętego do komory spalania może być uznana za zmienną losową o rozkładzie normalnym $N(E(D), \sigma)$. Wtedy statystyka $\frac{n\sigma^{*2}}{\sigma^2}$ ma rozkład χ^2 o $k = n - 1$ stopniach swobody. Zatem przedział dla nieznannej wartości oczekiwanej zmiennej losowej D można wyznaczyć z zależności [4, 9]:

$$P\left\{\chi_1^2 \leq \frac{n\sigma^{*2}}{\sigma^2} \leq \chi_2^2\right\} = \beta \quad (9)$$

gdzie:

n – liczba kropeł rozpylonego paliwa,

β – przyjęty poziom ufności,

χ_1^2, χ_2^2 – wartości zmiennej losowej (statystyki) χ o $k = n - 1$ stopniach swobody spełniających warunki przedstawione zależnościami (10):

$$\left. \begin{aligned} P\{\chi^2 \geq \chi_1^2\} &= 1 - \frac{\alpha}{2} \\ P\{\chi^2 \geq \chi_2^2\} &= \frac{\alpha}{2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

przy czym: $\alpha = 1 - \beta$, a wielkość σ^2 jest określona wzorem (7).

po odpowiednim przekształceniu zależności (9) uzyskuje się następujący wzór na określenie przedziału ufności nieznanego odchylenia standardowego:

$$P\left\{\sigma^* \sqrt{\frac{n}{\chi_2^2}} \leq \sigma \leq \sigma^* \sqrt{\frac{n}{\chi_1^2}}\right\} = \beta \quad (11)$$

Z zależności (11) wynika, że nieznaną wartość odchylenia standardowego σ z prawdopodobieństwem β zawarta jest w przedziale o następujących losowych końcach:

$$\sigma^* \sqrt{\frac{n}{\chi_1^2}}, \sigma^* \sqrt{\frac{n}{\chi_2^2}}.$$

Dla dużych ilości kropeł ($n > 30$) paliwa wtrysniętego do komory spalania, można przyjąć, że statystyka σ^2 ma w przybliżeniu rozkład normalny $N\left(\sigma, \frac{\sigma}{\sqrt{2n}}\right)$. Wówczas można napisać następującą zależność [4]:

$$P\left\{\frac{\sigma^*}{1 + y_\alpha \frac{1}{\sqrt{2n}}} \leq \sigma \leq \frac{\sigma^*}{1 - y_\alpha \frac{1}{\sqrt{2n}}}\right\} = \beta \quad (12)$$

Jednorodność rozpylania paliwa może być oceniana dodatkowo w przypadku sporządzenia widma lub charakterystyki rozpylenia tego paliwa [17, 18, 22].

C. Stopień rozpylenia paliwa

Stopień rozpylenia paliwa może być określony przez wartość oczekiwaną średnicy kropli $E(D)$. Estymatorem wartości oczekiwanej średnicy kropli $E(D)$ jest średnia arytmetyczna \bar{d} (4.5). Innym estymatorem $E(D)$, przydatnym do oceny stopnia rozpylenia paliwa, jest środek rozstępu Δd_{max} , który można określić następująco [4, 12]:

$$\Delta d_{max} = d_{max} - d_{min} \quad (13)$$

Średnia arytmetyczna jest najefektywniejszym estymatorem wartości oczekiwanej, a więc lepszym niż środek rozstępu [4] i dlatego bardziej przydatnym do oceny stopnia rozpylenia paliwa.

Estymacja wartości oczekiwanej $E(D)$ polegająca na jej oszacowaniu w formie średniej arytmetycznej \bar{d} (5) jest estymacją punktową. Ta metoda estymacji nie daje jednak możliwości określenia dokładności oceny (oszacowania) $E(D)$. Dokładność taka umożliwia estymacja przedziałowa, w której wyznaczany jest przedział ufności. [4, 9].

Przedziałem ufności nieznaney wartości oczekiwanej $E(D)$ nazywany jest przedział (\underline{d}, \bar{d}) o losowych końcach, który z określonym z góry prawdopodobieństwem β (zwanym poziomem ufności) zawiera nieznaną wartość $E(D)$ [9].

Wiadomo, że wyznaczona według wzoru (5) średnia \bar{d} jest zaobserwowaną wartością statystyki \bar{D} mającej rozkład asymptotycznie normalny $N\left(E(D), \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)$, niezależnie od postaci funkcyjnej zmiennej losowej D [4]. Wartość $E(D)$ i σ oznaczają wartość oczekiwaną (przeciętną) i odchylenie standardowe (średnie) średnicy kropli D , która jest zmienną losową.

W przypadku gdyby była znana wartość σ , to korzystając z rozkładu $N\left(E(D), \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)$ statystyki \bar{D} można przedział ufności dla nieznannej wartości oczekiwanej $E(D)$ wyznaczyć z następującego wzoru [9]:

$$P\left\{\bar{d} - y_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq E(D) \leq \bar{d} + y_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right\} = \beta \quad (14)$$

gdzie:

y_α – zmienna standaryzowana rozkładu normalnego, odpowiadająca przedziałowi ufności $\beta = 1 - \alpha$.

Najczęściej jednak wartość σ nie jest znana i trzeba ją oszacować na podstawie uzyskanych wyników badań z zależności (4.7) bądź z wzoru:

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \quad (15)$$

Wtedy przy założeniu, że zmienna losowa D ma rozkład normalny $N(E(D), \sigma)$ można wykorzystać to, że zmienna losowa $\frac{\bar{D} - E(D)}{\sigma^*} \sqrt{n-1}$ ma rozkład t -Studenta o $k = n - 1$ stopniach swobody. Założenie, że zmienna losowa D ma rozkład normalny $N(E(D), \sigma)$ praktycznie nie stanowi ograniczenia, gdyż statystyka \bar{D} zawsze ma rozkład asymptotycznie normalny $N\left(E(D), \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)$, przy czym zbieżność tego rozkładu do rozkładu normalnego jest bardzo szybka. z tej statystyki można korzystać już dla $n \geq 4$, czyli praktycznie biorąc – zawsze [4].

Wobec tego przedział ufności, można wyznaczyć z zależności [4, 9, 12]:

$$P\left\{\bar{d} - t_{\alpha, n-1} \frac{\sigma^*}{\sqrt{n-1}} \leq E(D) \leq \bar{d} + t_{\alpha, n-1} \frac{\sigma^*}{\sqrt{n-1}}\right\} = \beta \quad (16)$$

gdzie:

$t_{\alpha, n-1}$ – współczynnik rozkładu t -Studenta, którego wartości są takie, że $P\{|t| \geq t_\alpha\} = \alpha$

Duży stopień rozpylenia paliwa oznacza małą średnicę kropli, a więc małą wartość oczekiwaną $E(D)$ zmiennej losowej D .

Analizując przedstawione w podpunktach A, B, C wzory, należy przyjąć następującą interpretację:

- 1) dokładność rozpylenia paliwa pogarsza się, gdy rosną wielkości $\Delta d, \Delta \bar{d}$;
- 2) stopień rozpylenia paliwa pogarsza się, gdy rośnie $E(D), \Delta d_{max}$;

- 3) jednorodność rozpylenia paliwa pogarsza się, gdy rosną wielkości σ^2 , σ , ν .

Istotnym problemem jest także znalezienie zależności między jakością rozpylenia paliwa w danej komorze spalania silnika rzeczywistego a jakością rozpylenia paliwa w specjalnej komorze odpowiedniego stanowiska badawczego. Jest to istotne, dlatego że badanie jakości rozpylenia paliwa może być wykonywane w komorze silnika zainstalowanego w laboratorium badawczym, podobnego do silnika rzeczywistego, co obniża koszty badań. Oczywiście jest, że specjalna komora spalania silnika zainstalowanego w laboratorium musi być adekwatnym modelem komory spalania silnika rzeczywistego.

4. Uwagi i wnioski

Na przebieg procesy spalania istotny wpływ ma jakość rozpylenia paliwa. Z tego też powodu została przedstawiona propozycja oceny jakości rozpylenia paliwa poprzez identyfikację takich jej składowych (cech) jak: dokładność rozpylenia, stopień rozpylenia, jednorodność rozpylenia. podano deterministyczne i probabilistyczne miary wymienionych składowych jakości rozpylenia paliwa.

Proces rozpylenia paliwa w przestrzeniach roboczych każdego silnika jest procesem losowym [1]. Wielkości charakteryzujące ten proces, takie jak średnica kropli paliwa (D), długości strumienia (L), kąt wierzchołkowy (kąt rozpylenia) poszczególnych strug strumienia paliwa, kąt wierzchołkowy poszczególnych strug strumienia paliwa (B), promień strumienia mierzonego w określonej odległości od wylotu z otworu rozpylacza (R), wskaźnik równomierności rozpylenia paliwa (Z), wskaźnik stężenia rdzenia strumienia paliwa (N), średnice (szerokość) strumienia paliwa rozpylonego przez rozpylacz wielootworowy (S) są zmiennymi losowymi. Wobec tego ocena tych składowych jakości rozpylenia (JR) paliwa powinna być dokonywana z uwzględnieniem rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej.

Do oceny wspomnianych wielkości charakteryzujących jakość rozpylenia (JR) paliwa, jako zmiennych losowych, może być zastosowana zarówno estymacja punktowa jak też estymacja przedziałowa wartości oczekiwanych tych zmiennych. Estymacja punktowa umożliwi oszacowanie wartości oczekiwanej danej zmiennej losowej w formie średniej arytmetycznej, natomiast w przypadku zastosowania estymacji przedziałowej wyznaczany jest przedział ufności o losowych granicach (końcach), który zawiera tę wartość oczekiwaną. Korzystniejsze jest zastosowanie estymacji przedziałowej, gdyż estymacja punktowa nie daje możliwości określenia dokładności oceny (oszacowania) wartości oczekiwanej danej zmiennej (wielkości) losowej, np. średnicy kropli paliwa (D). Dokładność taką umożliwia estymacja przedziałowa, w której wyznaczany jest przedział ufności, w którym z określonym prawdopodobieństwem β (zwanym poziomem ufności) zawarta jest wartość oczekiwana wielkości charakteryzującej jakość rozpylenia paliwa.

LITERATURA

1. Adamczyk A., Lotko W.: Zastosowanie mieszanin paliw alternatywnych i oleju napędowego w silnikach z wtryskiem bezpośrednim. AUTO-Technika Motoryzacyjna Nr 11/90.
2. Bielaczyc P., Merkisz J., Pielecha J.: Stan cieplny silnika spalinowego a emisja związków szkodliwych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2001.

3. Brun R.: Szybkobieżne silniki wysokoprężne. WKiŁ, Warszawa 1973. Dane o oryginale: Science et Technique du Moteur Diesel Industriel et de Transport. Copyright by Societe des Editions Technip et Institut Francais du Petrole, Paris 1967.
4. Firkowicz S.: Statystyczna ocena jakości i niezawodności lamp elektronowych. WNT, Warszawa 1963.
5. Girtler J.: Diagnostyka jako warunek sterowania eksploatacją okrętowych silników spalinowych. Studia Nr 28, WSM, Szczeci 1997.
6. Girtler J.: Możliwości zastosowania i przydatność procesów semimarkowskich jako modeli procesów eksploatacji maszyn. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, z. 3/1996, s. 419-428.
7. Girtler J., Kuzmider S., Plewiński L.: Wybrane zagadnienia eksploatacji statków morskich w aspekcie bezpieczeństwa żeglugi. *Monografia*. WSM, Szczecin 2003.
8. Grabski F.: Teoria semi-markowskich procesów eksploatacji obiektów technicznych. Zeszyty Naukowe AMW, nr 75 A, Gdynia 1982.
9. Greń J.: Modele i zadania statystyki matematycznej. PWN, Warszawa 1968.
10. Heywood J.B.: Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill Book Company, Series in Mechanical Engineering, New York 1988.
11. Höglund P.G., Ydstedt A.: Reduced Air Pollution and Fuel Consumption with Preheated Car Engines. Urban Transport and the Environment for the 21st Century, International Conference, Lisbon 1998.
12. Krzysztofiak M., Urbanek D.: Metody statystyczne. PWN, Warszawa 1979.
13. Larson R.E.: Vehicle Emission Characteristics under Cold Ambient Conditions. SAE Technical Paper 890021.
14. Lindl B., Schmotz H.G.: Cold Start Equipment for Diesel direct Injection Engines. SAE Technical Paper 1999-01-1244.
15. Lotko W.: Zasilanie silników spalinowych paliwami alternatywnymi. ITE, Radom 1995.
16. Pawłow B., W.: Badania diagnostyczne w technice. WNT, Warszawa 1967.
17. Piotrowski I.: Okrętowe silniki spalinowe. WM, Gdańsk 1971.
18. Piotrowski I., Witkowski K.: Eksploatacja okrętowych silników spalinowych. AM, Gdynia 2002.
19. Samhaber Ch., Wimmer A., Loibner E., Bartsch P.: Simulation of Engine Warm-Up. 21 Internationales Wiener Motorensymposium, Vien 2000.
20. Schürfeld A.: Vrbesserung der Kaltstartfähigkeit und Reduzierung der Rauchemissionen bei Kaltstart und Warmlauf von Dieselmotoren durch Ansaugluftvorwärmung mit einen Brennersystem variabler Leistung. PIERBUNG AG, Neuss 1997.
21. Volk W.: Statystyka stosowana dla inżynierów. WNT, Warszawa 1965.
22. Wajand J.A.: Silniki o zapłonie samoczynnym. WNT, Warszawa 1988.
23. Zabłocki M.: Wtrysk i spalanie w silnikach wysokoprężnych. WKiŁ, Warszawa 1976.
24. Słownik języka polskiego.