

Rating causes the non-repeatability of an internal combustion engine operating states in the sets of his work conditions

The non-repeatability of the engine operating conditions, resulting measurement, is the consequence of inherent limitations in the cognitive process. For size, which have a clear physical interpretation, as a non-repeatability factor measurements can be assumed coefficient of variation. The work is structured causes of the non-repeatability of the measurement results as a result of random phenomena and imperfections analysis of the results. To assess the reasons for the non-repeatability of engine operating conditions used in the work theory of fuzzy sets. The examples of the use of fuzzy set theory to assess the reasons for the non-repeatability of intensity measurements of exhaust components emission from an engine.

Key words: *internal combustion engines, non-repeatability of test results, engine operating states, fuzzy sets*

Ocena przyczyn niepowtarzalności stanów pracy silnika spalinowego w zbiorach warunków jego pracy

Niepowtarzalność stanów pracy silnika, będących wynikiem pomiarów, jest skutkiem nieuniknionych ograniczeń w procesie poznania. Dla wielkości, które mają jednoznaczną interpretację fizyczną, jako współczynnik niepowtarzalności wyników pomiarów można przyjąć współczynnik zmienności. W pracy są usystematyzowane przyczyny niepowtarzalności wyników pomiarów jako skutek zjawisk przypadkowych oraz niedoskonałości analizy wyników. Do oceny przyczyn niepowtarzalności stanów pracy silnika wykorzystuje się w pracy teorię zbiorów rozmytych. Przedstawiono przykłady zastosowania teorii zbiorów rozmytych do oceny przyczyn niepowtarzalności wyników pomiarów natężenia emisji składników spalin silnika.

Słowa kluczowe: *spalinowe, niepowtarzalność wyników badań, stany pracy silnika, zbiory rozmyte*

1. Wstęp

Badania niepowtarzalności wyników pomiarów umożliwiają pozyskanie wiedzy nie tylko o badanych zjawiskach, ale i o ich naturze [4, 6]. Wynika to z nieuniknionej ograniczonej procesy poznania, która uzasadnia traktowanie wielu badanych procesów jako procesy przypadkowe [3]. Takimi obiektami, które są bardzo wrażliwe na ograniczoność poznania ich właściwości ze względu na złożoność zjawisk w nich zachodzących, są silniki spalinowe, szczególnie badane w warunkach dynamicznych [1, 2, 4, 6, 9, 11, 12].

Przez stany pracy silnika rozumie się wielkości, charakteryzujące tę pracę [5]. W warunkach typowego użytkownika silnika najczęściej są to wielkości charakteryzujące [5]:

- właściwości energetyczne ze względu na możliwość wykonania pracy, takie jak moc użyteczna,
- procesy zachodzące w silniku podlegające sterowaniu, takie jak przede wszystkim sterowanie silnika przez operatora, ale także np.: kąt wyprzedzenia zapłonu lub kąt wyprzedzenia wtrysku itp.,

- właściwości ekonomiczne ze względu na zużycie paliwa, takie jak: sprawność ogólna czy jednostkowe zużycie paliwa itd.,
- właściwości charakteryzujące procesy towarzyszące pracy silnika, m.in. właściwości ekologiczne ze względu na emisję zanieczyszczeń oraz emisję hałasu.

Dla wielkości, które mają jednoznaczną interpretację fizyczną, jako miarę niepowtarzalności wyników pomiarów można przyjąć współczynnik zmienności [8] wyników serii pomiarów. W odniesieniu do stanów pracy silnika zjawisko niepowtarzalności można rozważać oddzielnie dla każdej wielkości, opisującej jego stan pracy. W tym przypadku serię pomiarów branych pod uwagę będzie stanowił zbiór warunków pracy silnika, w których rozpatrywane były stany pracy [4, 6].

Niepowtarzalność stanów pracy silnika w zbiorach warunków jego pracy jest zjawiskiem utrudniającym ocenę właściwości użytkowych silnika, dlatego jest celowe rozważenie możliwych przyczyn tego zjawiska [1, 11].

2. Przyczyny niepowtarzalności wyników pomiarów

Można wyróżnić dwie podstawowe grupy przyczyn niepowtarzalności wyników pomiarów:

- zjawiska przypadkowe procesu pomiaru,
- niedoskonałość analizy wyników.

Pod pojęciem zjawisk przypadkowych procesu pomiaru rozumie się wszystkie przyczyny niepowtarzalności, na które badacz nie ma bezpośredniego wpływu. W związku z ograniczeniami wiedzy na temat przyczyn tych zjawisk można je traktować jako przypadkowe. Do takich przyczyn należą między innymi: zmienne warunki pracy silnika, zmienny charakter jego pracy, niedoskonałość przyrządów pomiarowych, niedoskonałość metod pomiarowych itp. Tego typu zjawiska są niepożądanymi, ale nie sposób ich całkowicie uniknąć. Oczywiście zawsze istnieje możliwość zastosowania przyrządów pomiarowych wyższej klasy, jednak wzięwszy pod uwagę zmienny charakter pracy silnika, powodujący wiele zjawisk przypadkowych, nie zawsze takie przedsięwzięcie będzie uzasadnione.

Niedoskonałość analizy wyników wiąże się natomiast z interpretacją niektórych informacji zawartych w wynikach pomiarów jako niepowtarzalności, podczas gdy w rzeczywistości może to być na przykład efekt niewłaściwego przyporządkowania różnych stanów do jednego zbioru. Dlatego czynnik ten będzie dalej szczegółowo omawiany.

O ile wpływ zjawisk przypadkowych na niepowtarzalność jest nieunikniony i powinien być dobrze wyeksponowany przez metodę analizy wyników, o tyle wpływ przyporządkowania do zbiorów warunków jest efektem niedoskonałości metody analizy i powinien być minimalizowany.

W modelu przyczynowym stany pracy silnika zależą jednoznacznie od warunków jego pracy. W związku z tym im bardziej dokładnie zostaną wyznaczone warunki pracy, tym mniejszej niepowtarzalności stanów należy się spodziewać. Dokładne wyznaczenie warunków wiąże się jednak z koniecznością zmniejszenia mocy zbiorów warunków. Aby tego dokonać, a przy tym nie zmniejszyć liczby rozpatrywanych warunków, trzeba zwiększyć liczbę zbiorów warunków. Taki zabieg prowadzi w konsekwencji do utrudnienia dalszej analizy wyników, ponieważ jest konieczne rozpatrywanie i porównywanie ze sobą stanów pracy w większej liczbie zbiorów. Jest to więc rozwiązanie, które można zastosować jedynie w ograniczonym zakresie [2, 6].

Istnieje zatem potrzeba znalezienia narzędzia, które pozwoli na ocenę, jaka część niepowtarzalności wyników pochodzi ze zjawisk przypadkowych (które są nieuniknione), a jaka część wynika z niedoskonałości przyporządkowania wyników do zbiorów warunków pracy silnika. W tym celu zostanie wykorzystana teoria zbiorów rozmytych [7, 10].

3. Wykorzystanie zbiorów rozmytych do oceny przyczyn niepowtarzalności wyników pomiarów

Rozmyty zbiór wartości, w odróżnieniu od zbioru klasycznego, jest zdefiniowany za pomocą pojedynczej wartości charakterystycznej, a nie za pomocą granic, wewnątrz których liczby przynależą do zbioru. Wartość charakterystyczna reprezentuje idealny przypadek liczby, która w najdoskonalszy sposób przynależy do danego zbioru wartości.

Oprócz wartości charakterystycznej definiowana jest również funkcja charakterystyczna, której wartość informuje, na ile dany argument (dana liczba) przynależy do rozpatrywanego zbioru. Jej wartość równa 1 oznacza, że dana liczba całkowicie przynależy do danego zbioru. Zazwyczaj funkcja charakterystyczna przyjmuje wartość równą 1 tylko dla wartości charakterystycznej. Z kolei wartość równa 0 oznacza całkowity brak przynależności. Funkcja charakterystyczna przyjmuje cały zakres wartości od 0 do 1 dla różnych argumentów, dzięki czemu różne wartości przynależą do rozpatrywanego zbioru w różnym stopniu.

Postać funkcji charakterystycznych może być różna w zależności od potrzeb. Ważne jest jedynie, żeby była to funkcja obustronnie malejąca wokół wartości charakterystycznej. Stromość spadku funkcji będzie niosła informację o tym, jak bliskie sąsiedztwo wartości charakterystycznej należy uznać za silnie przynależące do zbioru, który ta wartość reprezentuje. Niekiedy do wartości zerowej funkcja dąży dopiero w nieskończoności (oraz w minus nieskończoności), a czasami wyznacza się arbitralnie pewne granice, poza którymi wartość funkcji charakterystycznej wynosi 0.

W prezentowanych rozważaniach funkcja charakterystyczna będzie miała kształt trójkątny. Wartość równa 1 jest oczywiście przypisana wartości charakterystycznej, a oprócz tego wyznaczone są granice, poza którymi funkcja ma wartość 0. W zakresach wartości pomiędzy wartością charakterystyczną, a wspomnianymi granicami, funkcja ma kształt linii prostych.

Należy rozróżnić zbiór wartości liczbowych od zbioru warunków, które są wielkością wielowymiarową. Warunkami pracy jest ogół wielkości, opisujących czynniki wpływające na stan pracy silnika. Każda taka wielkość jest podzielona na przedziały wartości, a zbiór warunków pracy silnika jest zdefiniowany jako kombinacja przynależności do poszczególnych przedziałów.

Tak pojęte zbiory warunków również mogą być rozmyte. W tym celu wystarczy, że przedziały wartości dla wszystkich parametrów, opisujących warunki będą zdefiniowane jako przedziały rozmyte (mające zamiast granic jedynie wartość charakterystyczną i funkcję charakterystyczną). Można wówczas rozważyć funkcję charakterystyczną przynależności do danego zbioru warunków, jako ilo-

czyn funkcji charakterystycznych wybranych przedziałów dla wszystkich wielkości, opisujących warunki pracy silnika.

Niech będzie zdefiniowana wartość progowa P , informująca o tym, które warunki pracy silnika są kwalifikowane do rozpatrywanego zbioru warunków. Wartość progowa będzie przyjmowała wartości od 0 do 1 (jak funkcja charakterystyczna). Dla P równego 0 do danego zbioru zostaną przyporządkowane wszystkie te warunki, które należały do niego w przypadku zbiorów klasycznych. Dla P równego 1 zostaną przyporządkowane tylko te przypadki, dla których wartości parametrów idealnie odpowiadają przyjętym wartościom charakterystycznym (wzorcowym). W tym przypadku może się okazać, że nie istnieje żaden przypadek odnotowany w danych badaniach, który tak idealnie odzwierciedla warunki uznane za wzorcowe dla rozpatrywanego zbioru warunków. Dla wartości progowych pośrednich, pomiędzy 0 i 1, do danego zbioru będą kwalifikowane warunki w pewnym stopniu podobne do warunków wzorcowych, ale nie odpowiadające im w pełni.

Następnie dla wybranego zbioru warunków można sporządzić wykres dwóch zależności:

współczynnika niepowtarzalności wyników wybranej wielkości, opisującej stan pracy silnika, dla warunków pracy silnika zakwalifikowanych przy zadanej wartości progowej w zależności od wartości progowej,

moc zbioru warunków przy zadanej wartości progowej w zależności od wartości progowej.

Te dwie zależności pozwolą na ocenę przyczyn zjawiska niepowtarzalności w danym zbiorze warunków. Zwiększanie wartości progowej będzie eliminowało wpływ niedoskonałości przyporządkowania do zbiorów warunków na niepowtarzalność wyników. Jeśli więc wraz ze zmianą wartości progowej wartość współczynnika niepowtarzalności będzie się zmieniać, będzie możliwa ocena tego zjawiska.

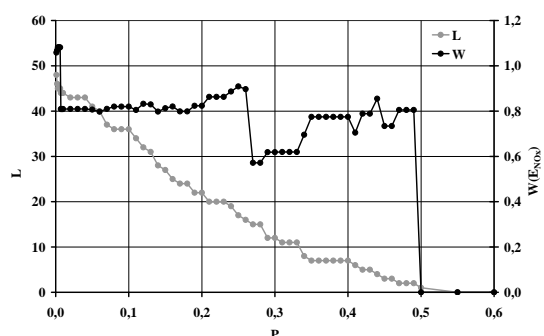
4. Przykładowe wyniki badań

Przykładowe wyniki badań dotyczą natężenia emisji tlenków azotu, cząstek stałych i tlenku węgla z silnika o zapłonie samoczynnym pracującego w warunkach statycznych.

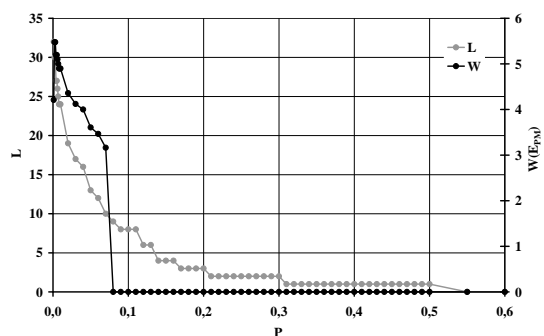
Na rysunkach 1–3 przedstawiono przykładową zależność współczynnika niepowtarzalności wyników w obrębie zbiorów warunków i mocy zbiorów warunków od wartości progowej.

Na wykresie na rysunku 1 współczynnik niepowtarzalności natężenia emisji tlenków azotu utrzymuje się na względnie stałym poziomie, pomimo że moc zbioru warunków maleje. Oznacza to, że w tym przypadku wartość współczynnika niepowtarzalności praktycznie nie zależy od wartości progowej, a tym samym od przyporządkowania warunków pracy silnika do wspólnego

zbioru. Można zakładać w takiej sytuacji, że zjawisko niepowtarzalności zależy przede wszystkim od zjawisk przypadkowych. Jest to na szczęście dość rzadko spotykany przypadek.



Rys. 1. Współczynnik niepowtarzalności W natężenia emisji tlenków azotu E_{NO_x} oraz moc zbioru warunków L w dziedzinie wartości progowej P dla wybranego zbioru warunków pracy silnika

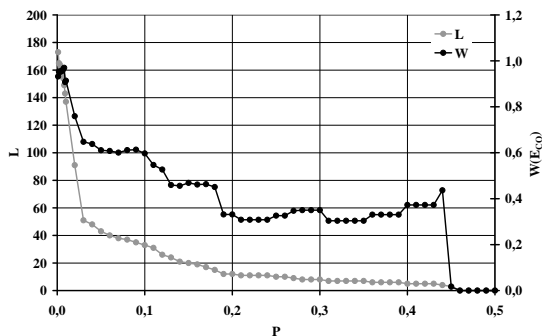


Rys. 2. Współczynnik niepowtarzalności W natężenia emisji cząstek stałych E_{PM} oraz moc zbioru warunków L w dziedzinie wartości progowej P dla wybranego zbioru warunków pracy silnika

Na rysunku 2 przedstawiono sytuację odwrotną, w której współczynnik niepowtarzalności osiągnął wartość zerową, zanim moc zbioru zmniejszyła się do zera. Oznacza to, że poprawiając za pomocą wartości progowej sposób przyporządkowania warunków pracy silnika do wspólnego zbioru, udało się całkowicie wyeliminować zjawisko niepowtarzalności. W danym przykładzie niepowtarzalność wynikała jedynie z niedoskonałości przyporządkowania do zbioru warunków, a nie miała swojej przyczyny w zjawiskach przypadkowych. Ten przypadek jest niestety równie rzadko spotykany, jak poprzedni.

Najczęściej spotykaną sytuacją jest ta, która jest przedstawiona na rysunku 3. Wraz ze wzrostem wartości progowej oraz ze zmniejszaniem się mocy rozpatrywanego zbioru warunków współczynnik niepowtarzalności początkowo zmniejsza się, a następnie stabilizuje się na względnie stałym poziomie. Oznacza to, że modyfikacja przyporządkowania do zbioru warunków zmniejszyła zjawisko niepowtarzalności, ale nie wyeliminowała go całkowicie. Przypuszcza się, że ustabilizowana wartość

współczynnika niepewtarzalności odpowiada tej niepewtarzalności, która wynika ze zjawisk przypadkowych.



Rys. 3. Współczynnik niepewtarzalności W natężenia emisji tlenku węgla E_{CO} oraz moc zbioru warunków L w dziedzinie wartości progowej P, dla wybranego zbioru warunków pracy silnika

Oczywiście dla wartości progowej, dla której moc zbioru warunków jest równa lub mniejsza od 1, współczynnik niepewtarzalności wynosi 0. Wy-

nika to z samej definicji współczynnika niepewtarzalności, odchylenie standardowe przyjmuje bowiem wówczas wartość 0. Nie należy tego jednak wiązać z eliminowaniem zjawiska, jakim jest niepewtarzalność.

5. Podsumowanie

W przedstawionych rozważaniach nie proponuje się zastąpienia zbiorów klasycznych zbiorami rozmytymi. Teoria liczb rozmytych może jedynie pomóc ocenić zjawisko niepewtarzalności w zbiorach, które ostatecznie pozostaną w wersji klasycznej.

Wydaje się, że ocena przyczyn zjawiska niepewtarzalności stanów pracy silnika w zbiorach jego stanów jest możliwa, jakkolwiek wiele zależności współczynnika niepewtarzalności i mocy zbiorów od wartości progowej może być trudnych do interpretacji, ich analiza daje jednak pewien pogląd, gdzie szukać głównego źródła zjawiska niepewtarzalności.

Literatura

- [1] Black J. et. al.: Diesel engine transient control and emissions response during a European extra-urban drive cycle (EUDC). SAE 2007-01-1938.
- [2] Chłopek Z., Pawlicki M., Sypowicz R.: The statistical analysis of the pollutant emission intensity from an internal combustion engine under conditions simulating the dynamic use, (Analiza statystyczna natężeń emisji zanieczyszczeń z silnika spalinowego w warunkach symulujących użytkowanie dynamiczne). Archiwum Motoryzacji 1/2005. 77–88.
- [3] Chłopek Z., Piaseczny L.: Remarks about the modelling in science researches. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability Nr 4(11)/2001. 47–57.
- [4] Chłopek Z., Stasiak P.: The analysis of an unrepeatability of cylinder pressure signal in internal combustion engines. Silniki Spalinowe – Combustion Engines Nr1/2005 (120). 31–39.
- [5] Chłopek Z.: Some remarks on engine testing in dynamic states. Silniki Spalinowe – Combustion Engines 4/2010(143). 60–72.
- [6] Chłopek Z.: Testing of non-repeatability of pollution emission from motor-car engines. Silniki Spalinowe – Combustion Engines Nr 1/2004 (118). 40–51.
- [7] Dubois D., Prade H.: Fuzzy sets and systems. Academic Press. New York 1988.
- [8] Fisz M.: Probability theory and mathematical statistics. Wiley. New York 1963.
- [9] Jantos J. et al.: Driveability and fuel consumption improvement through integrated fuzzy logic control of powertrain with spark ignition engine and continuously variable transmission. World Automotive Congress FISITA 2004. Barcelona.
- [10] Novák V., Perfilieva I., Močkoř J.: Mathematical principles of fuzzy logic Dodrecht: Kluwer Academic. 1999.
- [11] Serrano J. et al.: Cycle-to-cycle diesel combustion characterization during engine transient operation. SAE 2001-01-3262.
- [12] Tong H.Y., Hung W.T., Cheung C.S.: On-road motor vehicle emissions and fuel consumption in urban driving conditions. J. Air Waste Manage. Assoc. 50(4)/2000. 543–554.

Zdzisław Chłopek, DSc., DEng. – Professor in the Motor Transport Institute in Warsaw.

Prof. dr hab. inż. Zdzisław Chłopek – profesor w Instytucie Transportu Samochodowego w Warszawie.



Tomasz Szczepański, MSc, Eng. – Motor Transport Institute in Warsaw.

Mgr inż. Tomasz Szczepański – Instytut Transportu Samochodowego w Warszawie.

