

Zdzisław Chłopek
Tomasz Szczepański *

OCENA ZJAWISKA NIEPOWTARZALNOŚCI WYNIKÓW POMIARÓW W ZBIORACH DYNAMICZNYCH STANÓW PRACY SILNIKA SPALINOWEGO

Niepowtarzalność wyników pomiarów

Wykonując kilkakrotnie dowolny pomiar, otrzymujemy zbiór wyników pomiarów. Bardzo często okazuje się, że poszczególne elementy tego zbioru (czyli poszczególne wyniki pomiarów) nie są sobie równe. Takie zjawisko nazywamy niepowtarzalnością wyników pomiarów.

Aby zmierzyć zjawisko niepowtarzalności w sposób ilościowy najczęściej korzysta się ze wskaźnika niepowtarzalności w postaci:

$$W = \frac{\sigma}{\eta}, \quad (1)$$

gdzie: μ – wartość średnia wyników pomiarów,

σ – odchylenie standardowe wyników. [7, 8]

Stany statyczne i dynamiczne pracy silnika oraz ich opis parametryczny [1]

Stan pracy silnika jest opisany przez zbiór wielkości fizycznych S , które w danych okolicznościach (na przykład w danym badaniu) uznamy za istotnie pod względem informacji, jakie niosą o pracy silnika. Nazywamy je parametrami pracy silnika.

* prof. dr hab. inż. Zdzisław Chłopek
Instytut Transportu Samochodowego – Zakład Badań Ekonomicznych
ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa, tel.: (+48 22) 43 85 126

mgr inż. Tomasz Szczepański
Instytut Transportu Samochodowego – Zakład Procesów Diagnostyczno-Obsługowych
ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa, tel.: (+48 22) 43 85 520

$$S = \{s_1, s_2 \dots s_n\}, \quad (2)$$

gdzie: $s_1, s_2 \dots s_n$ - kolejne parametry pracy silnika.

W przypadku badania właściwości użytkowych silników spalinowych w stanach statycznych – w których parametry pracy nie zmieniają się w czasie – często spotykanym zbiorem parametrów jest:

$$S = \{n, M\}, \quad (3)$$

gdzie: n – prędkość obrotowa wału korbowego silnika,
 M - moment obrotowy na wale korbowym.

W przypadku badania silnika w stanach dynamicznych, w ogólności należy uwzględnić taką możliwość, w której wszystkie parametry pracy silnika będą zmienne w czasie. Wówczas zbiór S , aby uwzględniał wszystkie możliwe sytuacje, powinien przyjąć następującą postać:

$$S = \{s_1, s'_1, s_2, s'_2 \dots s_n, s'_n\}, \quad (4)$$

gdzie: $s'_1, s'_2 \dots s'_n$ - pochodne kolejnych parametrów pracy silnika liczone względem czasu.

W takim przypadku zbiór z równania (2) przyjmie postać:

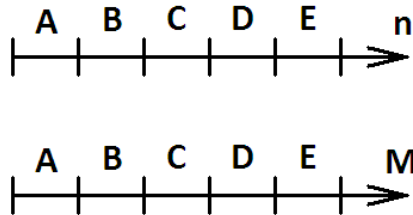
$$S = \{n, n', M, M'\} \quad (5)$$

gdzie: n' - pochodna prędkości obrotowej,
 M' - pochodna momentu obrotowego.

Jak widać na powyższym przykładzie – w przypadku stanów dynamicznych – liczba parametrów opisujących stan pracy silnika jest dwukrotnie większa, niż potrzeba do opisu stanu statycznego.

Niejednokrotnie możliwe jest ograniczenie liczby parametrów, które uznamy za istotne. W najogólniejszym przypadku należy się jednak liczyć z dwukrotnie bardziej złożonym opisem [3, 4].

Dla rozważanego przypadku statycznego, dla którego przyjęliśmy parametry: n oraz M , jako opisujące stan pracy silnika – podzielimy przyjmowane przez nie wartości na przedziały.



Rys. 1. Podział wartości parametrów: n i M na przedziały

Na rysunku 1. został przedstawiony podział wartości na 5 równomiernych przedziałów.

Poszczególne stany pracy będą wówczas definiowane przez przynależność wartości n i M do poszczególnych kombinacji przedziałów, oznaczanych: A, B, C, D, E. Na przykład stan nr 1. może być zdefiniowany dla n należących do przedziału A (na osi n) oraz M należących do przedziału A (na osi M). Stan nr 2. można zdefiniować analogicznie, jako przynależność n do A oraz M do B.

Ile stanów pracy powstanie przy takim ich zdefiniowaniu? Dokładnie tyle, ile jest kombinacji przedziałów, czyli:

$$L = s^p, \quad (6)$$

gdzie: L – liczba stanów pracy,

s – liczba parametrów opisujących stany pracy,

p – liczba rozpatrywanych przedziałów.

W rozważanym przypadku statycznym liczba stanów pracy wyniesie: $2^5 = 32$. Jest to liczba możliwa do zaakceptowania – to znaczy, że 32 stany pracy nadają się do prowadzenia analiz poszczególnych stanów w stosunkowo wygodny sposób.

Jeśli jednak weźmiemy pod uwagę przypadek dynamiczny, dla którego potrzebujemy dwukrotnie więcej parametrów opisujących stan pracy silnika – wówczas liczba parametrów wzrośnie nam do: $4^5 = 1024$. Jest to liczba stanów trudna do ujęcia w badaniach porównawczych, czy analizujących poszczególne stany.

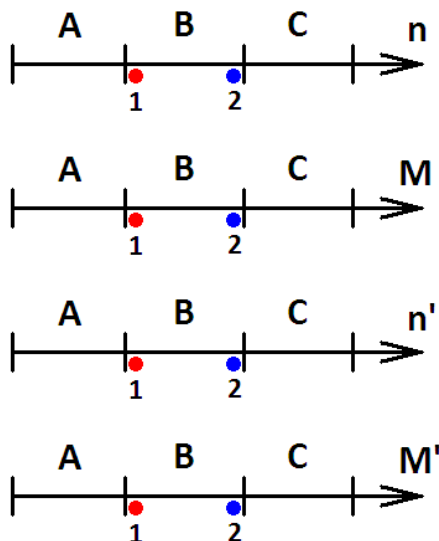
Jednym z najpowszechniejszych sposobów rozwiązania tego problemu jest zmniejszenie liczby rozpatrywanych przedziałów, na które dzielimy wartości poszczególnych parametrów pracy silnika.

Jeśli zmniejszymy ich liczbę w naszym przypadku z 5 do 3, na podstawie wzoru (3) otrzymamy liczbę stanów pracy równą: $4^3 = 64$. Jest to znów liczba możliwa do zaakceptowania.

Takie rozwiązanie rodzi jednak nowe problemy. Zmniejszenie liczby przedziałów wiąże się z rozszerzeniem ich zakresu, a to z kolei wiąże się z problemem zwiększonej niepowtarzalności wyników w obrębie tak zdefiniowanych stanów pracy silnika.

Niepowtarzalność w zbiorach stanów dynamicznych

Rozważmy dwa stany pracy silnika, należące do tego samego zbioru stanów.



Rys. 2. Dwa różne stany pracy silnika należące do tego samego zbioru stanów

Na rysunku 2 przedstawiono dwa różne stany pracy silnika. Wszystkie wartości parametrów je opisujących mieszczą się w przedziałach oznaczonych jako B. Tym samym obydwie stany należą do tego samego zbioru stanów.

Warto jednak podkreślić, że są to różne stany. Chociaż ich wartości mieszczą się w tych samych przedziałach, nie są jednak równe. Jeśli na przykład weźmiemy pod uwagę natężenie emisji tlenku węgla w obydwu tych stanach, najprawdopodobniej okaże się, że te wartości są zupełnie inne. Nazwiemy to wówczas niepowtarzalnością wyników pomiarów [2, 9]. Warto jednak zastanowić się nad przyczynami takiej niepowtarzalności oraz nad możliwościami jej minimalizacji.

Przyczyny niepowtarzalności i możliwości jej minimalizacji

Można wyróżnić dwie podstawowe grupy przyczyn niepowtarzalności wyników pomiarów:

- zjawiska przypadkowe,
- niedoskonałość przyporządkowania do zbioru stanów.

Pod pojęciem zjawisk przypadkowych należy rozumieć wszystkie przyczyny niepowtarzalności, na które nie mamy bezpośredniego wpływu i w pewnym stopniu uproszczenia przyjmujemy, że mają charakter przypadkowy. Do takich przyczyn należą między innymi: zmienne warunki pracy silnika, zmienny charakter jego pracy, czy niedoskonałość przyrządów pomiarowych.

Tego typu zjawiska są niepożądane, ale nie jesteśmy w stanie ich uniknąć. Oczywiście zawsze istnieje możliwość zastosowania przyrządów pomiarowych wyższej klasy, jednak wzięwszy pod uwagę zmienny charakter pracy silnika generujący wiele zjawisk przypadkowych – nie zawsze takie przedsięwzięcie będzie miało sens.

Z kolei niedoskonałość przyporządkowania do zbioru stanów nie jest czynnikiem niezależnym od osoby prowadzącej badania. Wręcz przeciwnie – jest efektem przyjętej metody analizy wyników, która interpretuje niektóre cechy badanych stanów pracy jako niepowtarzalność wyników.

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

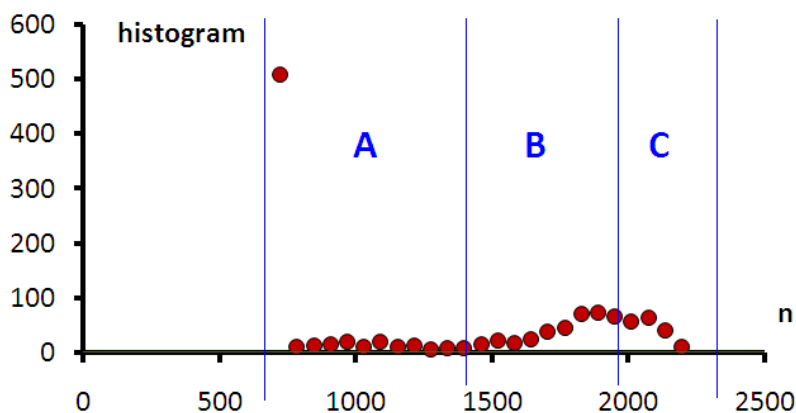
Najczęstsze sposoby minimalizacji wpływu przyporządkowania do zbioru stanów na niepowtarzalność polegają na zwiększaniu liczby przedziałów, na jakie dzieli się wartości parametrów opisujących pracę silnika. Jednak jak wykazano wyżej – takie podejście prowadzi do niepożądanego zwiększenia liczby stanów pracy i w wielu przypadkach nie może być przyjęte.

Niniejszy artykuł przedstawia nieco inny sposób uporania się z tym problemem. Opiera się on na wykorzystaniu w analizie wyników tak zwanych „liczb rozmytych” [5].

Liczby rozmyte i opis stanów pracy silnika za ich pomocą

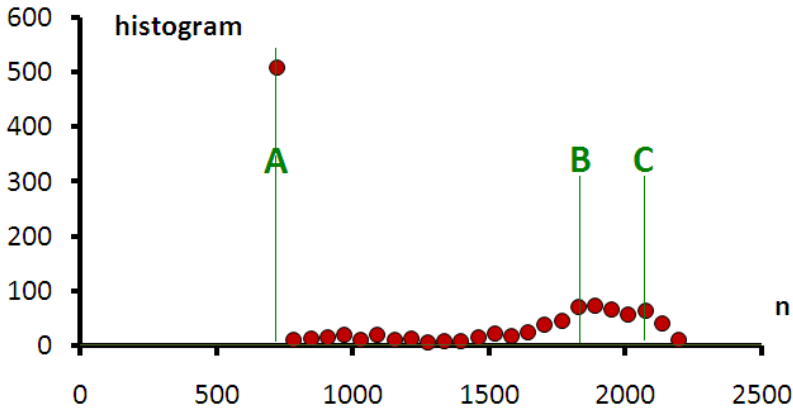
Rozpatrzmy na przykładzie prędkości obrotowej n , jak możemy podzielić wartości przyjmowane przez n .

Rysunek 3 przedstawia histogram [6] wartości n – wykonany na podstawie testu HDDTT (Heavy Duty Diesel Transient Test) dla silnika „Detroit Diesel Series 50”. Jak widać, najczęściej występującymi wartościami n są wartości małe, odpowiadające pracy silnika na biegu jałowym. Istnieją oprócz tego dwa inne maksima lokalne funkcji histogramu, odpowiadające pracy silnika z większymi prędkościami obrotowymi. Dzieliąc wartości n na przedziały (w metodzie klasycznej) warto wykonać to tak, żeby w każdym przedziale znajdowało się jedno maksimum lokalne. Wówczas każdy przedział będzie charakterystyczny dla pewnej, dość często występującej wartości prędkości obrotowej.



Rys. 3. Histogram prędkości obrotowej n z zaznaczonymi klasycznymi przedziałami wartości: A, B i C

W przypadku liczb rozmytych, nie definiujemy przedziałów ze sztywno zaznaczonymi granicami pomiędzy nimi. Zamiast tego określamy na początku wartości, które uznamy za charakterystyczne. [5] Przedstawia to rysunek 4., gdzie za wartości charakterystyczne przyjęto te, dla których występują maksima lokalne na histogramie.

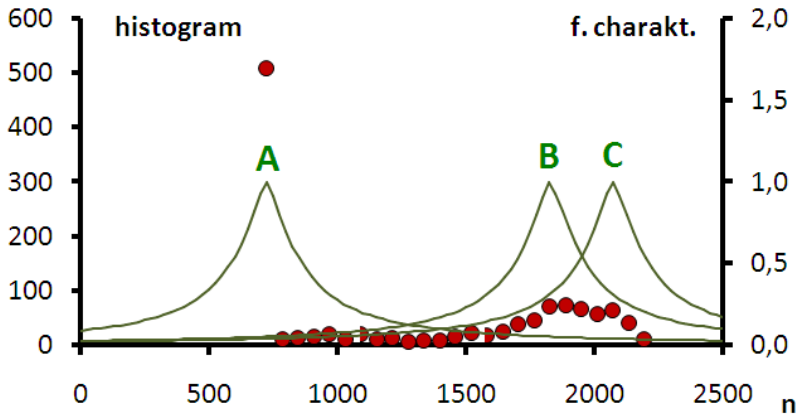


Rys. 4. Wartości charakterystyczne: A, B oraz C na histogramie prędkości obrotowej n

Następnie dla każdej wartości charakterystycznej definiujemy jej funkcję charakterystyczną, której zadaniem jest opisanie, w jakim stopniu poszczególne wartości odpowiadają danej wartości charakterystycznej. Jeśli na przykład funkcja charakterystyczna B dla danej wartości n wynosi 1, oznacza to, że jest to wartość idealnie odpowiadająca wartości charakterystycznej B. Jeśli z kolei wartość dla danego n wynosi 0, oznacza to, że dane n w żaden sposób nie odpowiada wartości charakterystycznej B. [5]

Kształt funkcji charakterystycznych może być różny. Ważne jest, aby dla wartości charakterystycznych wartość funkcji wynosiła 1 oraz żeby była to funkcja obustronnie malejąca (wokół wartości charakterystycznej). Stromość spadku wartości funkcji będzie miała wpływ na to, jak szeroki zakres wartości uznamy za bliski wartościom charakterystycznym.

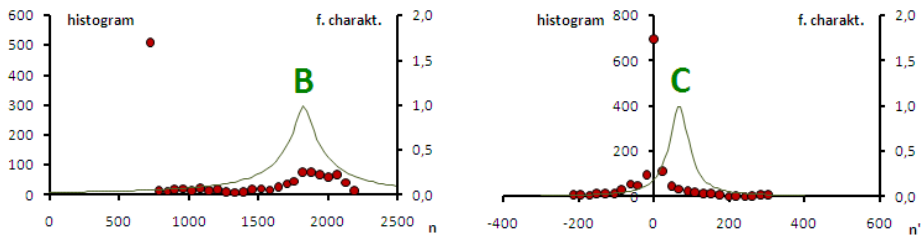
Przykładowy kształt tak zbudowanych funkcji charakterystycznych przedstawia rysunek 5.

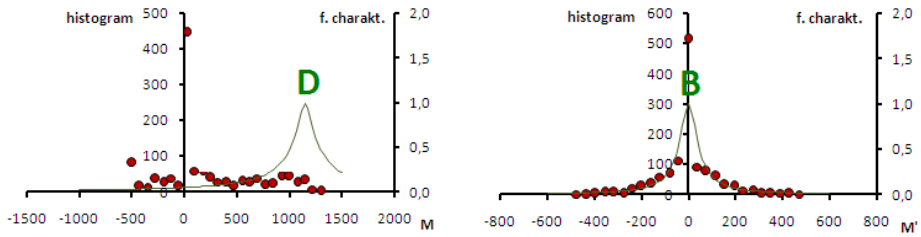


Rys. 5. Funkcje charakterystyczne opisujące trzy przedziały rozmyte zdefiniowane dla n

Oczywiście taki opis wartości charakterystycznych i ich funkcji należy przeprowadzić dla wszystkich parametrów pracy silnika, które definiują nam stan jego pracy. W naszym przykładzie będą to: n , n' , M , M' .

Otrzymujemy w efekcie 4 parametry ze zdefiniowanymi przedziałami rozmytymi (opisanymi funkcjami charakterystycznymi). Jak teraz zdefiniujemy poszczególne stany pracy silnika? Rozpatrzmy na przykład stan „BCDB” zdefiniowany przez wartości: $n \in B$, $n' \in C$, $M \in D$, $M' \in B$. Przedstawia to rysunek 6., na którym dla każdego parametru pracy silnika pozostała nam tylko jedna funkcja charakterystyczna.





Rys. 6. Wybrane funkcje charakterystyczne dla czterech parametrów pracy silnika

Stan pracy silnika możemy zdefiniować jako funkcję czterowymiarową: $St(n, n', M, M')$. Dla każdego stanu pracy silnika otrzymujemy wartości czterech funkcji charakterystycznych: $F(n)$, $F(n')$, $F(M)$, $F(M')$.

Zdefiniujmy teraz funkcję charakterystyczną dla danego stanu, będącą iloczynem istniejących czterech funkcji charakterystycznych:

$$F(St) \equiv F(n, n', M, M') = F(n) \cdot F(n') \cdot F(M) \cdot F(M'). \quad (7)$$

Tak zdefiniowana charakterystyczna funkcja stanu pracy silnika informuje nas o tym, w jakim stopniu poszczególne stany pracy silnika odpowiadają stanowi przyjętemu za wzorcowy, zdefiniowanemu przez wartości charakterystyczne dla wszystkich czterech parametrów pracy silnika.

W ten sposób możemy określić wszystkie stany „wzorcowe” (charakterystyczne). Ile ich będzie? Tak jak w przypadku zbiorów stanów definiowanych w sposób klasyczny - tyle, ile wynosi liczba kombinacji przyjętych wartości charakterystycznych dla poszczególnych parametrów pracy silnika – zgodnie ze wzorem (6).

Przynależność do pojedynczego zbioru stanów pracy jest w tym przypadku rozmyta – określona przez stopień podobieństwa do stanu wzorcowego (charakterystycznego). Ten sam stan pracy może jednocześnie przynależać do kilku różnych zbiorów rozmytych, ale do każdego z nich będzie przynależał w innym stopniu i zawsze będzie istniał taki zbiór, do którego będzie należał najpełniej.

Ocena zjawiska niepowtarzalności w zbiorach rozmytych

Jak zauważono przed chwilą, dla każdego stanu pracy można rozpatrywać jego przynależność do różnych zbiorów stanów. Warto przy tym rozważyć to zagadnienie od strony liczności zbioru rozmytego.

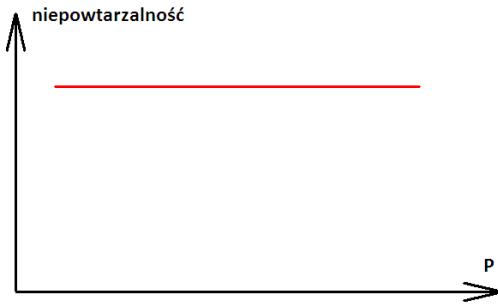
Teoretycznie do każdego zbioru stanów (zdefiniowanych jako rozmyte) możemy zaliczyć wszystkie stany pracy silnika występujące w danym badaniu. Jednak większość z nich będzie przynależała do tego zbioru w stopniu niewielkim (a niektóre wręcz w stopniu zerowym). Tylko nieliczne stany pracy będą posiadały wartość funkcji charakterystycznej dla danego zbioru bliską jedności. Powstaje oczywiście pytanie, które stany są na tyle bliskie stanowi wzorcowemu, żeby przypisać je tam w praktyce.

Zdefiniujmy sobie nową wartość P , która określi nam wartość progową. Teraz do danego zbioru stanów pracy będziemy przyporządkowywać tylko te stany, dla których funkcja charakterystyczna jest niemniejsza od P .

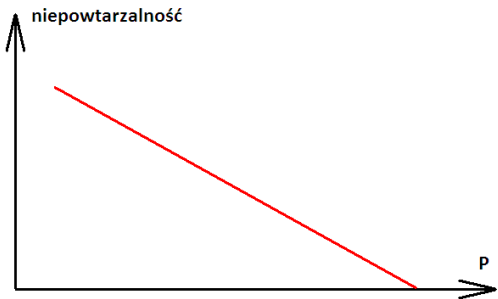
Innymi słowy – wartość P mówi na o tym, jak rygorystycznie patrzymy na przyporządkowanie poszczególnych stanów pracy silnika do wybranego zbioru stanów. Dla P bliskiego 1 tylko nieliczne stany pracy zakwalifikujemy do danego zbioru – ale za to będą to stany niemal idealnie odpowiadające stanowi wzorcowemu, definiującemu ten zbiór. Z kolei dla małych wartości P zbiór stanów stanie się dużo bardziej liczny, ale stanie się to kosztem dużo większej różnorodności stanów pracy przynależących do niego.

W podrozdziale dotyczącym przyczyn zjawiska niepowtarzalności wyników wyrażono opinię, że sposób przyporządkowania stanów pracy silnika do zbioru stanów ma wpływ na niepowtarzalność. Należy się w związku z tym spodziewać, że będzie istniała pewna zależność pomiędzy wskaźnikiem niepowtarzalności W – ze wzoru (1), a wartością progową P . Dla każdego zbioru stanów pracy silnika zdefiniowanego za pomocą teorii liczb rozmytych można sporządzić funkcję $W(P)$ i na jej podstawie wnioskować o wpływie przyjętej metody analizy wyników na zjawisko niepowtarzalności.

Rysunek 7 przedstawia 3 modelowe przypadki interpretacji funkcji $W(P)$, oznaczone odpowiednio: a), b) i c).



a) niepowtarzalność wynikająca jedynie ze zjawisk przypadkowych



b) niepowtarzalność wynikająca jedynie z przyporządkowania do zbioru stanów



c) niepowtarzalność wynikająca z dwóch przyczyn

Rys. 7. Modelowe przypadki przyczyn zjawiska niepowtarzalności

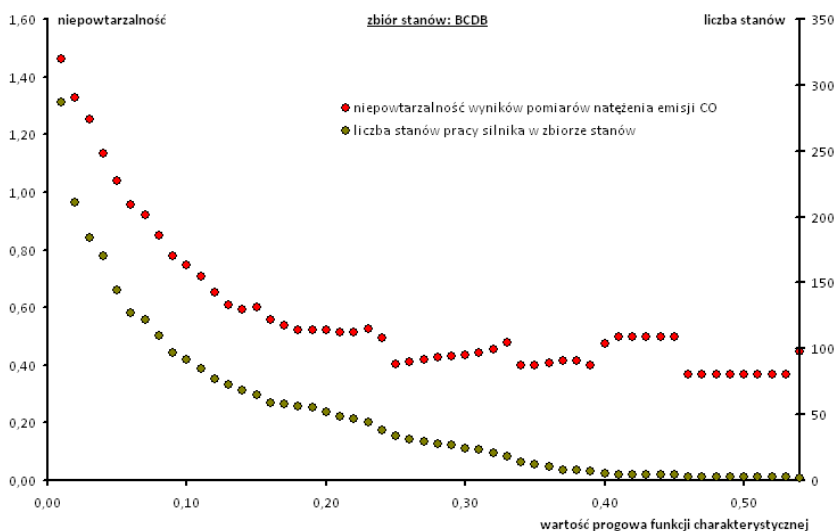
Jeżeli zjawisko niepowtarzalności wynika jedynie ze zjawisk przypadkowych, a wpływ przyporządkowania stanów pracy silnika do zbioru stanów jest minimalny – przypadek a) – wówczas funkcja wskaźnika niepowtarzalności $W(P)$ powinna być względnie stała.

Jeżeli zjawisko niepowtarzalności wynika jedynie z przyjętej metody przyporządkowania stanów pracy silnika do zbioru stanów, a wpływ zjawisk przypadkowych jest minimalny – przypadek b) – wówczas funkcja $W(P)$ powinna maleć do zera wraz ze wzrostem wartości progowej P .

Jeżeli natomiast zjawisko niepowtarzalności wynika po części z obydwu opisanych zjawisk, wówczas funkcja $W(P)$ powinna maleć wraz ze wzrostem wartości P , ale nie powinna osiągnąć nigdy zera. Można nawet pokusić się o wniosek, według którego minimalna wartość wskaźnika niepowtarzalności mówi nam, na ile istotny jest wpływ zjawisk przypadkowych.

Przykładowe wyniki badań

Na rysunkach od 8 do 11 przedstawiono analizę przykładowych wyników badań. Oprócz funkcji $W(P)$ zawierają one również funkcję $N(P)$, gdzie N jest liczbą stanów pracy zaliczonych do rozpatrywanego zbioru stanów. Wartości wskaźnika niepowtarzalności obliczono zgodnie ze wzorem (1) dla natężenia emisji tlenku węgla (dla tych stanów pracy, które dla przyjętej wartości progowej P były zaliczane do rozpatrywanego zbioru stanów).

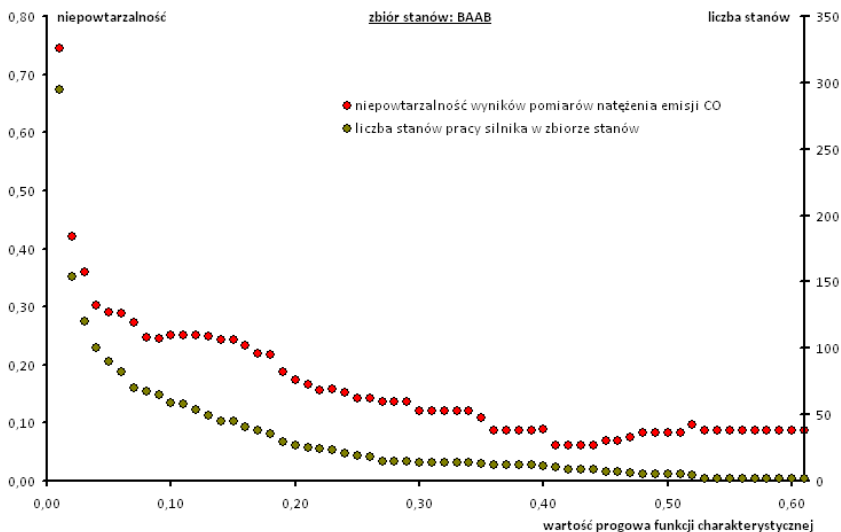


Rys. 8. Funkcje $W(P)$ i $N(P)$ dla zbioru stanów „BCDB”

Na rysunku 8 widać, jak funkcja $W(P)$ zmniejsza się od wartości 1,5, aż osiąga wartość około 0,4 i na niej się mniej więcej stabilizuje. Trzeba też zwrócić uwagę, że wraz ze wzrostem liczby P liczba stanów zakwalifikowanych do wybranego zbioru maleje do zera. Jednak wartości wskaźnika W zaczynają być stabilne nieco wcześniej, bo już w sytuacji, w której licznosc zbioru jest w granicach 40. Nie dziwi fakt, że tam, gdzie $N(P)$ jest bliskie zeru, $W(P)$ jest stabilne. Jednak fakt, że tam, gdzie $N(P) \approx 40$,

$W(P)$ jest stabilne na poziomie 0,4 – oznacza, że udało się wyeliminować wpływ sposobu przyporządkowania do zbioru stanów na zjawisko niepowtarzalności. Wartość wskaźnika W równą 0,4 można zatem uznać, za wynikającą głównie ze zjawisk przypadkowych i nie jest możliwe wyeliminowanie ich wpływu na niepowtarzalność wyników.

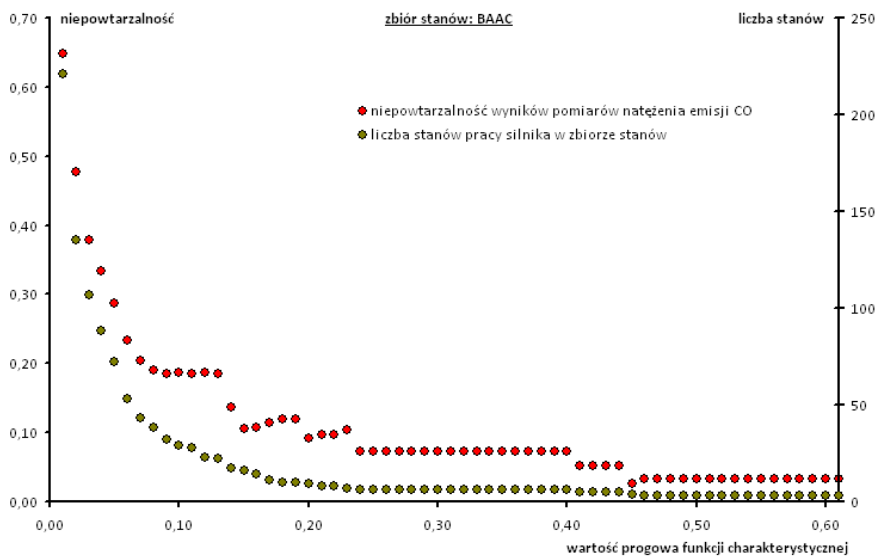
Rysunek 9 przedstawia bardzo podobny przypadek, ale tutaj wartość współczynnika W zaczyna się stabilizować dopiero wtedy, gdy liczba stanów N jest znacznie mniejsza – poniżej dziesięciu. Jak widać, aby sprowadzić wartość wskaźnika W do wartości względnie stałej, trzeba w tym przypadku dość mocno ograniczyć liczbę próbek (stanów pracy wchodzących w skład danego zbioru). Za to te stany pracy, które pozostały po selekcji wykazują dużo mniejszą niepowtarzalność (blisko czterokrotnie mniejszą, niż w przypadku poprzednim).



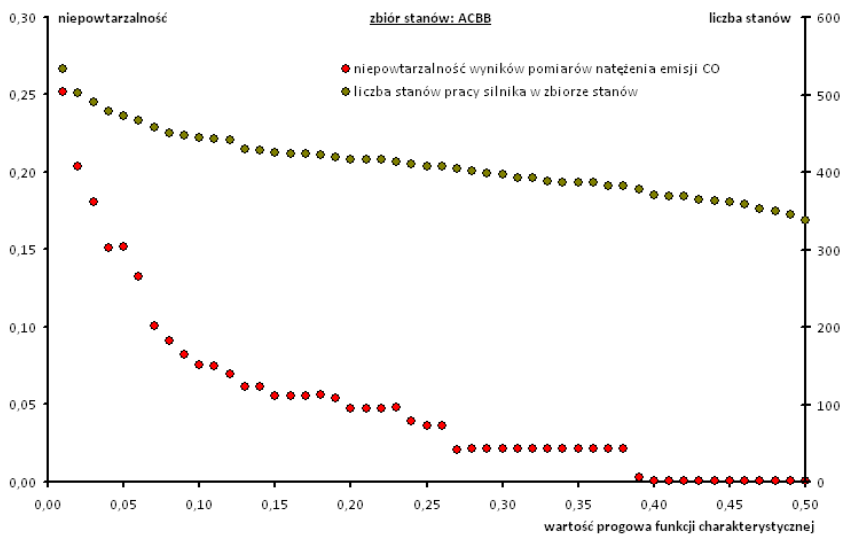
Rys. 9. Funkcje $W(P)$ i $N(P)$ dla zbioru stanów „BAAB”

Kolejny rysunek – nr 10. przedstawia sytuację, w której od samego początku stabilizowanie się wartości wskaźnika W jest okupione bardzo niewielką liczbą stanów pracy braną pod uwagę. Trzeba jednak zaznaczyć, że zbiór stanów oznaczony jako BAAC odpowiada dość specyficznej sytuacji w badaniach, kiedy prędkość obrotowa maleje, a przy tym moment obrotowy jest ujemny i rośnie. Odpowiada to sytuacji końca procesu hamowania silnikiem, kiedy prędkość obrotowa jeszcze spada, ale moment obrotowy już

zaczyna rosnąć. Nie powinien więc dziwić fakt, że w tak specyficznych warunkach można znaleźć tylko niewiele stanów pracy dobrze reprezentujących rozważaną sytuację.



Rys. 10. Funkcje $W(P)$ i $N(P)$ dla zbioru stanów „BAAC”



Rys. 11. Funkcje $W(P)$ i $N(P)$ dla zbioru stanów „ACBB”

Ostatni rysunek – nr 11. pokazuje z kolei sytuację idealną, w której pomimo dużej liczności zbioru stanów pracy wartość wskaźnika niepowtarzalności szybko spada do zera. W tym przypadku okazuje się, że zjawiska przypadkowe miały bardzo niewielki wpływ na efekt niepowtarzalności (co nie oznacza oczywiście, że ich nie było).

Podsumowanie

Jak widać, zjawisko niepowtarzalności wyników pomiarów w zbiorach dynamicznych stanów pracy silnika bywa dość kłopotliwe i trudne do jego ograniczenia. Sama możliwość oceny tego zjawiska wymaga stosunkowo dużego nakładu pracy podczas analizy wyników [7].

Istnieje jednak możliwość minimalizacji tej części niepowtarzalności, która wynika z niedoskonałych metod przetwarzania i analizy wyników. Nie eliminuje to w żadnym stopniu tej części niepowtarzalności, która wynika ze zjawisk przypadkowych zachodzących w silniku oraz w torze pomiarowym, ale pozwala na jej ocenę.

Takie podejście może pomóc w rozwoju badań nad stanami dynamicznymi silników spalinowych zmierzających do ich bardziej kompleksowej analizy.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. Chłopek Z.: Uwagi do badań silników spalinowych w stanach dynamicznych, Silniki spalinowe nr 4/2010,
- [2]. Chłopek Z., Pawlicki M., Sypowicz R.: Analiza statystyczna natężeń emisji zanieczyszczeń z silnika spalinowego w warunkach symulujących użytkowanie dynamiczne, Archiwum Motoryzacji, Wydawnictwo Naukowe PTNM, 2005,
- [3]. Black J., Eastwood P. i inni: Diesel engine transient control and emissions response during a European extra-urban drive cycle (EUDC), Paper No. 2007-01-1938, Wydawnictwo SAE 2007,
- [4]. Serrano J. i inni: Cycle-to-cycle diesel combustion characterization during engine transient operation, Paper No. 2001-01-3262, Wydawnictwo SAE 2001,
- [5]. Łachwa A.: Rozmyty świat zbiorów, liczb, relacji, faktów, reguł i decyzji, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001,
- [6]. Brandt S.: Analiza danych. Metody statystyczne i obliczeniowe, PWN, Warszawa 1999,
- [7]. Chłopek Z., Stasiak P.: The analysis of an unrepeatability of cylinder pressure signal in internal combustion engines. Silniki Spalinowe – Combustion Engines Nr1/2005 (120), s. 31-39,

- [8]. Chłopek Z.: Niepowtarzalność emisji zanieczyszczeń z silnika spalinowego o zapłonie iskrowym, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów 1–2/2004, s. 5-14,
- [9] Chłopek Z.: Testing of non–repeatability of pollution emission from motor–car engines. Silniki Spalinowe – Combustion Engines Nr 1/2004 (118), s. 40-51.