

CHARAKTERYSTYKI EKOLOGICZNE SILNIKÓW SPALINOWYCH W STANACH PRZYPADKOWYCH

Praca dotyczy metody oceny emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa dla silników spalinowych o różnych zastosowaniach, pracujących w stanach przypadkowych. Stany przypadkowe pracy silnika, to takie, które nie są zdeterminowane schematem narzucanych warunków pracy, a w szczególności nie są ograniczane do stanów statycznych. Proponowana metoda jest uniwersalna w stosunku do silników spalinowych o zastosowaniach zarówno samochodowych, jak i innych. Wyznaczone dzięki niej charakterystyki mogą być wykorzystane do bilansowania emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa dla silników spalinowych o różnych zastosowaniach.

(z pracy ITS nr 6410/ZDO)

1. Wprowadzenie

Dotychczasowe metody badań użytkowych właściwości silników spalinowych (ze względu na emisję zanieczyszczeń oraz zużycie paliwa) sprowadzają się do badań w przyczynowych (zdeterminowanych) stanach pracy. Wiedza o właściwościach silników spalinowych, znajdujących się w stanach przypadkowych, jest niewielka, fragmentaryczna i nieusystematyzowana. Jest możliwe zaproponowanie wielowymiarowych charakterystyk emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa, jednak – mimo niekwestionowanych zalet poznawczych – ich praktyczne wykorzystanie jest mało realne.[1-2, 5, 7-8, 11-12] W związku z tym jest celowe zaproponowanie wielkości, opisujących stany przypadkowe pracy silników spalinowych. Wielkości te mogą być wykorzystane jako zmienne niezależne jednowymiarowych charakterystyk emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa w przypadkowych stanach pracy silników spalinowych.

Stany przypadkowe pracy silnika, to takie, które nie są zdeterminowane schematem narzucanych warunków pracy, a w szczególności nie są ograniczane do stanów statycznych. Oczywiście w praktyce, zarówno w rzeczywistych warunkach pracy silnika, jak i w warunkach laboratoryjnych, warunki pracy są zawsze narzucone. Jest to wynikiem panujących warunków na drodze (w przypadku silnika trakcyjnego) lub realizowanym testem hamownianym, który odzwierciedla określone warunki drogowe. Zazwyczaj jednak nie występuje w nich powtarzalny schemat. Stany pracy silnika charakteryzują się wówczas dużą zmiennością (dynamiką), co w konsekwencji prowadzi do trudności przy ich opisie.[6, 9]

Sekwencję kolejno występujących stanów pracy można analizować jako proces, albo można rozpatrywać każdy kolejny stan niezależnie, traktując je jako niezdeterminowane (przypadkowe). W niniejszej pracy zostało zrealizowane to drugie podejście. W celu sporządzenia charakterystyk ekologicznych silnika w stanach przypadkowych konieczne było opracowanie metody analizy wyników badań silnika, która umożliwi opis jego właściwości w tych stanach, a w szczególności w stanach dynamicznych, które wiążą się z największymi trudnościami przy ich opisie.[3, 5, 8] Zaproponowana metoda skupia się więc na rozwiązaniu pięciu podstawowych problemów, dotyczących pracy silnika w stanach dynamicznych.

2. Zamiana zależności operatorowych silnika na zależności funkcyjne

W omawianej metodzie silnik modelowany jest jako układ automatyki, wiążący parametry wejściowe (warunki pracy silnika) i wyjściowe (świadczące o stanie pracy silnika). Dobór rozpatrywanych parametrów pracy silnika może być różny, w zależności od właściwości, które mają zostać zbadane.[3-4]

Warunki pracy silnika reprezentowane są przez parametr sterowania s , moment oporu zadawany na wał korbowy silnika M_r oraz prędkość obrotową wału korbowego silnika n . Do parametrów wyjściowych, definiujących stan pracy silnika, należą: efektywny moment obrotowy generowany przez silnik na wale korbowym M_e , natężenie emisji wybranych substancji w spalinach E_x , oraz prędkość obrotowa wału korbowego silnika n . Ostatnia wielkość występuje zarówno w parametrach wejściowych, jak i w wyjściowych, co powoduje wystąpienie sprzężenia zwrotnego układu. Ponieważ jego wartość jest taka sama na wejściu i na wyjściu z przyjętego modelu, w dalszych rozważaniach zostanie on przypisany do parametrów wejściowych, ponieważ odgrywa znaczącą rolę przy definiowaniu warunków pracy silnika. W celu uproszczenia modelu, istnieje możliwość pominięcia parametru M_e , ponieważ jego wartość zależy od momentu oporu M_r oraz przyspieszenia kątownego n' (zgodnie z drugim prawem dynamiki Newtona odniesionego do ruchu obrotowego). Ostatecznie więc stan pracy będzie zdefiniowany przez natężenie emisji E_x poszczególnych substancji x w spalinach.[4]

Dla modelu opisanego jak powyżej, można zapisać zależności będące użytkowymi właściwościami silnika spalinowego, w następującej postaci – wzór (2.1.):

$$E_x(t) = F_x [n(t), M_r(t), s(t)], \quad (2.1.)$$

gdzie F_x wyraża poszukiwaną zależność. Jak widać F_x , jest zależnością operatorową, czyli taką, która przekształca przebiegi $n(t)$, $M_r(t)$, $s(t)$ w przebieg $E_x(t)$. Jest to możliwe najogólniejszy zapis. W sytuacji, kiedy zależność F_x nie jest znana, wartość E_x w bieżącej chwili t_b może teoretycznie zależeć od wartości n , M_r i s w dowolnych innych chwilach t . Jest to sytuacja bardzo niekomfortowa, ponieważ nie sposób zdefiniować w praktyce zależności F_x , które opisywałyby tak szerokie zjawisko. Istnieje więc potrzeba uproszczenia tych zależności, najlepiej do postaci funkcyjnej.

Traktując silnik jako układ przyczynowy, możemy wykluczyć wpływ na bieżący stan pracy wszystkie warunki występujące w chwilach następnych względem chwili bieżącej. Pozostają do rozważenia jedynie warunki w chwili bieżącej oraz w chwilach poprzednich. Powstaje więc pytanie, jak daleko sięgające w przeszłość warunki mogą mieć wymierny wpływ na stan pracy w chwili bieżącej. Traktując czas t jako wielkość dyskretną, można zapisać to w następującej postaci (2.2.).

$$E_x(t_b) = F_x [n(t_b \div t_{b-k}), M_r(t_b \div t_{b-k}), s(t_b \div t_{b-k})], \quad (2.2.)$$

gdzie parametr k określa, jak odległe w czasie warunki są brane pod uwagę.

Jeśli silnik charakteryzuje się silnymi właściwościami całkującymi, należy się liczyć z sytuacją, w której wszystkie warunki pracy (począwszy od początkowych) będą miały istotny wpływ na bieżący stan pracy. Jeśli jednak właściwości całkujące silnika są niewielkie (lub wręcz nie występują), wówczas bieżący stan pracy będzie zależał tylko od bieżących warunków, a zależność (2.2.) przyjmie postać funkcyjną. W ten sposób zostaną jednak wyeliminowane informacje o warunkach w chwilach poprzednich, a więc również o ich zmienności.

Jako pewien kompromis, przy założeniu relatywnie małych właściwości całkujących silnika, proponuje się przyjęcie wartości parametru k równego 1. Jest to najmniejsza liczba k ,

dla której jeszcze zachowane są informacje o zmienności warunków pracy silnika. W takim przypadku możemy zapisać zależność (2.3.).

$$E_x(t_b) = f_x(n(t_b), n(t_{b-1}), M_r(t_b), M_r(t_{b-1}), s(t_b), s(t_{b-1})) \quad (2.3.)$$

Jak widać, jest to już zależność funkcyjna f_x , chociaż liczba parametrów stanowiących dziedzinę powiększyła się dwukrotnie. Warto zauważyć, że dla dowolnego przebiegu $x(t)$ zbiór parametrów w postaci: $x(t_b)$ i $x(t_{b-1})$ niesie w sobie tę samą informację, co zbiór w postaci: $x(t_b)$ oraz $x'(t_b)$, gdzie x' jest pochodną wielkości x . Wprowadza to również bardziej czytelny rozdział parametrów na te, które informują o wartości danej wielkości fizycznej w danej chwili i na te, które informują o ich zmienności.

Wzór 2.3. można zatem zapisać w postaci (2.4.).

$$E_x(t_b) = f_x(n(t_b), n'(t_b), M_r(t_b), M_r'(t_b), s(t_b), s'(t_b)) \quad (3.4.)$$

Gdyby wprowadzać do powyższej zależności informacje o warunkach pracy w chwilach jeszcze wcześniejszych, byłoby to tożsame z wprowadzaniem kolejnych pochodnych poszczególnych parametrów: $x''(t_b)$, $x'''(t_b)$... Taki zabieg nie wydaje się jednak celowy, ponieważ ilość informacji, od których zależałby stan pracy silnika ponownie zwiększałby się do wartości niemożliwych do opisanania.[]

3. Wprowadzenie dziedziny zbiorów warunków

Przedstawione w poprzednim rozdziale model silnika zawiera wiele parametrów wejściowych (opisujących warunki pracy silnika). Oznacza to, że zależności pomiędzy parametrami wejściowymi i wyjściowymi (opisujące właściwości użytkowe silnika) są zdefiniowane w dziedzinie wielowymiarowej. Po zamianie zależności operatorowych na zależności funkcyjne liczba parametrów podwaja się, ponieważ trzeba uwzględnić zarówno parametry informujące o bieżącej wartości poszczególnych wielkości fizycznych, jak również parametry mówiące o ich zmienności w czasie. To sprawia, że duża liczba wymiarów dziedziny układu staje się poważnym problemem.

W prezentowanym podejściu proponuje się więc przejście do dziedziny nie zdefiniowanej bezpośrednio za pomocą wartości poszczególnych parametrów wejściowych, ale za pomocą zbiorów warunków pracy silnika. Procedura takiej zamiany zostanie omówiona poniżej.

Pierwszym zabiegiem prowadzącym do zdefiniowania zbiorów warunków jest podział zakresu wartości każdego parametru wejściowego na przedziały. W najprostszym przypadku można by wybrać arbitralnie liczbę przedziałów, a następnie wyznaczyć taką samą szerokość każdego przedziału, wynikającą z ilorazu zakresu wartości i liczby przedziałów. Nie jest to jednak zalecany sposób postępowania. Proponuje się dla każdego parametru wejściowego obliczenie jego histogramu, który pokaże, jak często występują poszczególne wartości. Wówczas możliwe będzie określenie, które wartości są najważniejsze (najliczniejsze). Granice poszczególnych przedziałów należy wtedy wyznaczyć pomiędzy wartościami przyjętymi jako najważniejsze, w taki sposób, żeby w każdym przedziale znajdowała się jedna wartość o względnie dużej wadze. Przy takim rozwiązaniu każdy przedział będzie reprezentował jedną, charakterystyczną wartość, która występuje względnie często.

Pojedynczy zbiór warunków pracy silnika niech będzie zdefiniowany jako przynależność do danej kombinacji przedziałów określonych dla poszczególnych parametrów wejściowych. W efekcie w każdym zbiorze znajdują się warunki reprezentowane przez określone wartości charakterystyczne (najliczniej występujące) dla każdego z parametrów. Niestety, tak zdefiniowanych zbiorów może się okazać bardzo wiele. Na przykład, jeśli dla każdego z sześciu parametrów wejściowych przyjmujemy po 5 przedziałów, liczba kombinacji wyniesie 15625. Istotny jest jednak fakt, że dla przykładowej liczby zbiorów, wynoszącej 15625,

większość zbiorów będzie pustych. Jeśli test hamowniany będzie składał się z 1000 – 2000 punktów pomiarowych, warunki pracy, które faktycznie wystąpią w czasie testu, będą stanowiły tylko niewielką część warunków zdefiniowanych poprzez ich zbiory. Nie należy się więc obawiać konieczności analizowania tak wielkiej liczby zbiorów, gdyż większość z nich będzie pusta.

Ciekawym zagadnieniem jest również to, jak warunki występujące w danym teście mogą się rozłożyć w zdefiniowanych zbiorach warunków (które teoretycznie mogłyby zaistnieć). Idealnym przypadkiem byłby ten, w którym wszystkie warunki rozdzieliłyby się na niewielką liczbę zbiorów w taki sposób, żeby wszystkie niepuste zbiory miały podobną moc. Drugim, skrajnym przypadkiem jest ten, w którym wszystkie warunki pracy silnika rozproszyły się po zdefiniowanych zbiorach w taki sposób, że moc żadnego zbioru nie przekroczy 1. Dużo korzystniejszym jest przypadek pierwszy, ponieważ występujące warunki są tam pogrupowane i możliwe jest prowadzenie obliczeń statystycznych wewnątrz wybranych zbiorów lub inna analiza właściwości silnika w danych zbiorach warunków. Należy się jednak spodziewać, że w wyniku rzeczywistych badań w warunkach dynamicznych zaistnieje sytuacja pośrednia pomiędzy dwoma przedstawionymi powyżej. Oznacza to, że część zbiorów warunków będzie się charakteryzowała dużą mocą, a część małą. Można się nawet spodziewać płynnego przejścia mocy zbiorów od dużej mocy do zbiorów pustych.

W takiej sytuacji istnieje możliwość wyboru tylko tych zbiorów stanów o dużej mocy. Można w tym celu wybrać arbitralnie moc graniczną, na przykład taką, dla której istnieje dostatecznie uzasadniona interpretacja operacji statystycznych, które planuje się wykonać na wybranych zbiorach. Można również założyć, jaką część wszystkich pomiarów pracy silnika zaistniałych w czasie testu należy uwzględnić. Wówczas warto sporządzić wykres sumy mocy zbiorów o mocy nie mniejszej niż graniczna, zależny od wartości granicznej. Na jego podstawie będzie można określić, jaką wartość graniczną mocy zbiorów trzeba przyjąć, żeby w dalszej analizie wyników uwzględnić zadaną liczbę pomiarów wykonanych w teście. Moc zbiorów nie jest jedynym kryterium, na podstawie którego można wybierać zbiory warunków do dalszej analizy. Można wybrać również te zbiory, w których właściwości silnika będą najbardziej interesujące. Jako przykład można podać średnią wartość natężenia emisji wybranej substancji w spalinach, albo średnią wartość sumy natężenia emisji wszystkich substancji zanieczyszczających mierzonych w spalinach (może to być również suma ważona).

Dość ciekawym kryterium wyboru zbiorów warunków może się okazać połączenie dwóch kryteriów przedstawionych powyżej. Przykładem niech będzie sumaryczna emisja wszystkich substancji zanieczyszczających, mierzonych w spalinach. Wartość tego parametru będzie zależała zarówno od średniej wartości natężenia emisji wszystkich substancji, jak również od mocy danego zbioru. W ten sposób wybrane zostaną te warunki pracy silnika, które są szczególnie niebezpieczne dla środowiska, ponieważ nie dość, że w danych warunkach natężenie emisji jest duże, to warunki te występują częściej, niż inne.

4. Niepowtarzalność właściwości w porównywalnych warunkach pracy

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 ilorazu odchylenia standardowego i wartości średniej. Można wyróżnić dwie podstawowe grupy przyczyn niepowtarzalności wyników pomiarów: zjawiska przypadkowe oraz niedoskonałość analizy wyników.

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, niedoskonałość przyrządów pomiarowych, niedoskonałość metod pomiarowych itp. Tego typu zjawiska są niepożądane, ale nie sposób ich całkowicie 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 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 do zbiorów stanów. Dlatego też 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.

Zgodnie z wnioskami z poprzedniego rozdziału, przyporządkowanie danych warunków pracy silnika do wybranego zbioru warunków polega na przynależności do danej kombinacji przedziałów określonych dla poszczególnych parametrów wejściowych. Problem wynika z niezerowej szerokości poszczególnych przedziałów. Im węższy przedział, tym jest bardziej jednoznacznie zdefiniowany. W przypadku przedziałów o dużej szerokości poszczególne zbiory warunków są tak naprawdę zdefiniowane niejednoznacznie. W efekcie do jednego zbioru warunków przypisane są warunki różniące się od siebie. W szczególnym przypadku różnice mogą występować we wszystkich parametrach wejściowych, definiujących warunki pracy silnika. Właśnie stąd wynika niepowtarzalność wyników w obrębie pojedynczego zbioru warunków, ponieważ różne warunki powodują różne stany pracy silnika.

Teoretycznie rozwiązaniem tego problemu byłoby zawężenie przedziałów definiowanych na poszczególnych parametrach wejściowych. Jednak taki zabieg doprowadziłby do zwiększenia liczby przedziałów, a zatem również do zwiększenia liczby zbiorów warunków. Jest to więc rozwiązanie, które można zastosować jedynie w ograniczonym zakresie. Istnieje więc potrzeba znalezienia narzędzia, które pozwoli na ocenę, jaka część niepowtarzalności wyników pochodzi ze zjawisk przypadkowych (których nie unikniemy), a jaka część wynika z niedoskonałości przyporządkowania wyników do zbiorów warunków pracy silnika. W tym celu zostanie wykorzystana teoria liczb rozmytych.[]

Pojęcie liczb rozmytych nie jest zbyt ściśle, ponieważ same liczby są definiowane w tym przypadku dokładnie tak samo, jak w rozważaniach klasycznych. Rozmycie dotyczy dosłownie przedziałów wartości, definiujących zbiory liczb. Rozmyty przedział wartości, w odróżnieniu od przedziału klasycznego, jest zdefiniowany za pomocą pojedynczej wartości charakterystycznej, a nie za pomocą granic, wewnątrz których liczby przynależą do przedziału. Wartość charakterystyczna reprezentuje idealny przypadek liczby, która w najdoskonalszy sposób przynależy do danego przedziału. Oprócz wartości charakterystycznej definiowana jest również funkcja charakterystyczna, której wartość informuje, na ile dany argument (dana liczba) przynależy do rozpatrywanego przedziału. Jej wartość równa 1 oznacza, że dana liczba całkowicie przynależy do danego przedziału. Zazwyczaj funkcja charakterystyczna przyjmuje wartość równą 1 tylko dla wartości charakterystycznej. Z kolei wartość równa 0 oznacza całkowity brak przynależności do rozpatrywanego przedziału. Funkcja charakterystyczna przyjmuje cały zakres wartości od 0 do 1 dla różnych argumentów, dzięki czemu różne wartości przynależą do rozpatrywanego przedziału w różnym stopniu.

W poprzednim rozdziale zostało zaproponowane wyznaczenie przedziałów (klasycznych) w taki sposób, żeby wewnątrz każdego z nich znajdowała się jedna wartość najistotniejsza (lokalnie najczęściej występująca). Będzie ona teraz utożsamiana z wartością charakterystyczną. Z kolei granice, poza którymi funkcja charakterystyczna będzie przyjmowała wartości równe 0, będą tożsame z granicami przedziałów klasycznych. W efekcie przedział rozmyty będzie miał taki sam zakres, jak przedział klasyczny, a dodatkowo jego funkcja charakterystyczna będzie określała, na ile wartości w jego wnętrzu są zbliżone do wartości charakterystycznej dla danego przedziału.

Omówiony zostanie teraz problem przynależności nie tylko do pojedynczego przedziału dla danego parametru wejściowego, ale do zbioru warunków pracy silnika, czyli przynależności do kombinacji przedziałów dla poszczególnych parametrów wejściowych. Zostanie w tym celu zdefiniowana funkcja charakterystyczna zbioru F_{ch} , opisująca stopień przynależności do danego zbioru warunków, jako iloczyn wartości funkcji charakterystycznych przyporządkowanych do przedziałów rozmytych, których kombinacja jest rozpatrywana. Zdefiniowana zostanie ponadto wartość progowa P , informująca o tym, które warunki pracy silnika są kwalifikowane do rozpatrywanego zbioru warunków. P będzie przyjmowała wartości od 0 do 1 (jak funkcja F_{ch}). Dla P bliskiego 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 wejściowych 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 P pośrednich, pomiędzy 0 i 1, do danego zbioru będą kwalifikowane warunki w pewnym stopniu podobne do warunków wzorcowych, ale nie odpowiadające im w zupełności.

Następnie dla wybranego zbioru warunków można sporządzić wykres dwóch zależności: niepowtarzalności wyników W danego parametru wyjściowego dla warunków pracy silnika zakwalifikowanych przy zadanej wartości progowej P w funkcji wartości progowej P oraz liczba warunków pracy silnika L zakwalifikowanych przy zadanej wartości progowej P w funkcji wartości progowej P . Te dwie zależności (najlepiej naniesione na jeden wykres) pozwolą na ocenę przyczyn zjawiska niepowtarzalności w danym zbiorze warunków. Zwiększanie P będzie bowiem eliminowało wpływ niedoskonałości przyporządkowania do zbiorów warunków na niepowtarzalność wyników. Jeśli więc wraz ze zmianą wartości P wartość W będzie się zmieniać, będzie możliwa ocena tego zjawiska. Możliwe interpretacje tych wyników zostaną przedstawione w punkcie poniżej.

Wśród możliwych kształtów funkcji $W(P)$ i $L(P)$ opisanych powyżej warto wymienić kilka szczególnych przypadków, z których wnioski będą świadczyły o przyczynach zjawiska niepowtarzalności wyników.

- $W(P)$ stałe (lub rosnące). Oznacza to, że niepowtarzalność w tym przypadku nie wynika z niedoskonałości przyporządkowania do danego zbioru warunków.
- $W(P)$ malejące i stabilizujące się na wartości powyżej 0. W tym przypadku niepowtarzalność zależy zarówno od zjawisk przypadkowych, jak i od niedoskonałości przyporządkowania do zbioru stanów. Tę drugą przyczynę udało się wyeliminować, a wartość, na której się ustabilizowała, jest wartością niepowtarzalności odpowiadającą zjawiskom przypadkowym.
- $W(P)$ malejące do 0 zanim $L(P)$ zmaleje do 1. Oznacza to, że niepowtarzalność w tym przypadku zależała jedynie od niedoskonałości przyporządkowania do zbioru warunków i udało się ją całkowicie wyeliminować (sprowadzić do wartości zerowej).
- $W(P)$ malejące do 0 wraz z $L(P)$ malejącym do 1 w tym samym czasie. W tym przypadku niepowtarzalność zależy od niedoskonałości przyporządkowania do zbioru

stanów i może również zależeć od zjawisk przypadkowych, ale nie sposób tego określić, ponieważ zmniejszenie L do 1 lub 0 samo w sobie zmniejsza niepowtarzalność wyników. Nie jest wówczas możliwe jednoznaczne oszacowanie udziału zjawisk przypadkowych jako przyczyny niepowtarzalności, choć można się spodziewać, że nie mają one dominującego wpływu.

- $W(P)$ stałe na poziomie wartości równym 0. Jest to przypadek szczególny, dla którego nie występuje w ogóle zjawisko niepowtarzalności, a więc nie ma też swoich przyczyn, które poddawane są ocenie.

5. Tworzenie charakterystyk ekologicznych

Zgodnie z wcześniejszymi spostrzeżeniami, model silnika w stanach dynamicznych jest opisany w przestrzeni wielowymiarowej. Jak wiadomo, graficzne przedstawienie zależności dla dziedziny o więcej niż trzech wymiarach jest bardzo trudne. W prezentowanym przykładzie pojawiła się dziedzina sześciowymiarowa, co sprawia, że bezpośrednie przedstawienie tych zależności jest niemożliwe.

Pewną propozycją wizualizacji użytkowych właściwości silnika w stanach przypadkowych jest zestawienie na jednym wykresie wyników z kilku sąsiadujących zbiorów stanów jego pracy. Należy w tym celu wybrać jeden parametr wejściowy, którego wpływ na stan pracy silnika będzie rozważany. Następnie wybiera się zestaw kilku zbiorów stanów pracy, mających identyczne wartości wszystkich wielkości, opisujących warunki pracy silnika, z wyjątkiem tego jednego parametru, którego zmienność jest analizowana. W efekcie wybrane zbiory stanów będą się różniły tym jednym parametrem. Na wykresie będzie wówczas widoczna zależność wybranego parametru wyjściowego od wybranego parametru wejściowego, przy zachowaniu ograniczeń w postaci niezmiennych wszystkich innych parametrów wejściowych, opisujących warunki pracy silnika w danym przypadku.

Aby otrzymać pełniejszy obraz tego typu zależności, można wybrać jeden zbiór stanów pracy silnika, a następnie sporządzić dla niego zestaw wykresów odpowiadających zależnościom wszystkich interesujących parametrów wyjściowych od wszystkich parametrów wejściowych.

6. Przykłady obliczeń na podstawie rzeczywistych wyników pomiarów

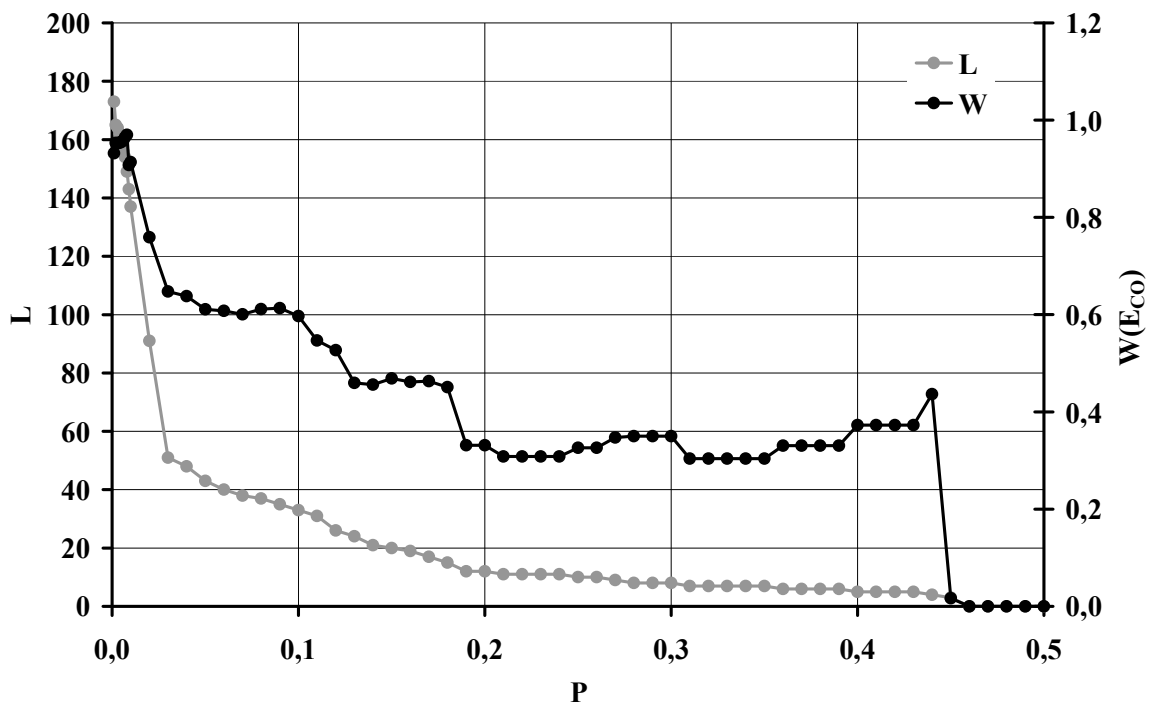
Na potrzeby zilustrowania powyższych rozważań wykorzystano wyniki pomiarów pochodzące z testu jezdnego FTP-75, zrealizowanego czterokrotnie dla samochodu osobowego z silnikiem o zapłonie iskrowym.

W toku obliczeń, zgodnie z opisem funkcyjnym zaproponowanym w rozdziale 2. założono model silnika, w którym parametrami wejściowymi były: prędkość obrotowa n , moment oporów M_r , parametr sterowania s , pochodna prędkości obrotowej n' , pochodna momentu obrotowego M_r' , pochodna parametru sterowania s' , natomiast parametrami wyjściowymi było natężenie emisji E_x wybranych substancji x zanieczyszczających spaliny.

Następnie, zgodnie z opisaną w rozdziale 3. dziedziną zbiorów, wyodrębniono poszczególne zbiory warunków pracy silnika i wybrano 10 spośród nich, charakteryzujących się największą mocą zbiorów (najliczniejszych zbiorów).

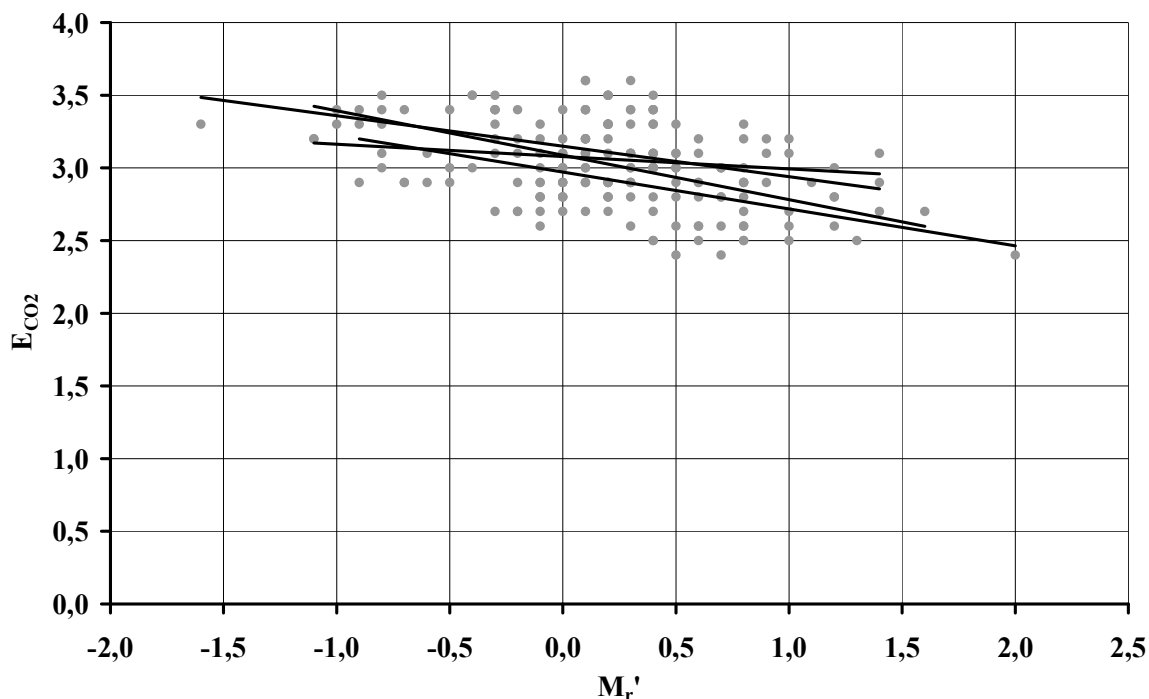
Zgodnie z metodą omówioną w rozdziale 4., dla każdego z dziesięciu zbiorów wyznaczono zależności niepowtarzalności $W(P)$ i mocy (liczności) zbiorów $L(P)$ zależnych od wartości progowej P . Na rys. 5.1. przedstawiono przykładowy wykres funkcji $W(P)$ i $L(P)$. Wraz ze wzrostem wartości progowej moc zbioru maleje, natomiast wskaźnik

niepowtarzalności początkowo maleje, a następnie stabilizuje się na niemal stałym poziomie. Jak wynika z przeprowadzonych analiz, jest to najbardziej typowy przypadek, który najczęściej występował w rozpatrywanych w pracy przykładach.



Rys. 5.1. Wykres niepowtarzalności W natężenia emisji tlenku węgla E_{CO} oraz mocy zbioru L w dziedzinie wartości progowej P

Ostatecznie dla wybranych zbiorów stanów pracy silnika sporządzono wykresy zgodnie z zaleceniami opisanymi w rozdziale 5. Na rys. 5.2. pokazano przykładowy wykres zależności natężenia emisji dwutlenku węgla E_{CO_2} w dziedzinie pochodnej momentu obrotowego M_r^1 dla wybranego zbioru stanów (oraz stanów sąsiadujących), wykonany dla wszystkich czterech realizacji testu jezdnych. Cztery linie proste widoczne na wykresie stanowią aproksymacje prezentowanej zależności odpowiadające kolejnym realizacjom testu. Stopień pokrywania się poszczególnych linii ten jest dość reprezentatywny i obrazuje powtarzalność wyników obliczeń prowadzonych niezależnie dla różnych realizacji wybranego testu. Widoczne rozbieżności pomiędzy poszczególnymi liniami ilustrują więc niepewność, jaką obarczone są wyniki obliczeń prezentowanej metody. Zauważyć jednak można ogólną zgodność prezentowanych zależności. Poniższy wykres stanowi przykład charakterystyki ekologicznej silnika wyznaczony na podstawie prezentowanej metody analizy wyników.



Rys. 5.2. Wykres natężenia emisji dwutlenku węgla E_{CO_2} w dziedzinie pochodnej momentu obrotowego M_r' dla wybranego zbioru stanów (oraz stanów sąsiadujących), wykonany dla wszystkich czterech realizacji testu jezdnego

7. Podsumowanie

Celem pracy było znalezienie rozwiązania kilku podstawowych problemów, jakie można spotkać podczas analizy zagadnień, związanych z pracą silnika spalinowego w stanach dynamicznych, aby na ich podstawie opracować metodę tworzenia charakterystyk ekologicznych silnika w stanach przypadkowych. W części teoretycznej pracy zostało omówionych kilka podstawowych problemów, a następnie zaproponowano ich rozwiązania. Przejście przez szereg tych zagadnień stanowi propozycję toku obliczeniowego, jakiemu można poddać wyniki badań silnika w, aby osiągnąć zamierzony cel pracy.

W dalszej części pracy wykorzystano badania hamowniane silnika, aby zastosować prezentowaną metodę w praktyce i zweryfikować ją. Obliczenia dla każdego z trzech testów hamownianych zostały wykonane czterokrotnie – oddzielnie dla każdej realizacji testu. Dzięki temu możliwa była ocena powtarzalności wniosków, wyciąganych za pomocą prezentowanej metody.

Ocena zgodności wniosków wyciąganych na poszczególnych etapach obliczeń z poszczególnych realizacji testów jest trudna, ponieważ same badania są obciążone pewną niepewnością, wynikającą ze zjawisk przypadkowych. Wydaje się jednak, że zaistniała względna zgodność wśród wyników obliczeń, prowadzonych dla poszczególnych realizacji testów, co pozwala uznać prezentowane w pracy rozważania, jako uzasadnione.

LITERATURA

- [1]. Arregle J., Bermudez V., Serrano J. R., Fuentes E.: Procedure for engine transient cycle emissions testing in real time. *Experimental Thermal And Fluid Science*. 2006. Volume 30, no5. 485–496.

- [2]. Bermúdez V., Luján J. M., Serrano J. R., Pla B.: Transient particle emission measurement with optical techniques. *Measurement Science and Technology* 2008 – 19 065404.
- [3]. Chłopek Z., Rostkowski J.: Analiza emisji zanieczyszczeń z silników o zapłonie samoczynnym w warunkach dynamicznych. *Archiwum Motoryzacji* 3/2003. 119–140.
- [4]. Chłopek Z., Szczepański T.: Badanie właściwości użytkowych silników spalinowych w stanach dynamicznych. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów* 2013, 92 (1).
- [5]. Chłopek Z.: Badania emisji zanieczyszczeń z silnika spalinowego w warunkach symulujących eksploatację trakcyjną. PAN Oddział w Krakowie. Komisja Motoryzacji. Zeszyt Nr 29–30. Kraków 2005. 79–84.
- [6]. Chłopek Z.: Metody badań właściwości silników spalinowych w warunkach przypadkowych modelujących użytkowanie. *Archiwum Motoryzacji* 4/2001. 187–210.
- [7]. Chłopek Z.: Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych. *Prace Naukowe. Seria „Mechanika”* z. 173. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1999.
- [8]. Chłopek Z.: Propozycja charakterystyk emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych pracujących w warunkach dynamicznych. *Archiwum Motoryzacji* 2/2009. 111–134.
- [9]. Chłopek Z.: The research of the probabilistic characteristics of exhaust emissions from vehicle engines. *Silniki Spalinowe – Combustion Engines* 1/2011(144). 49–56.
- [10]. Łachwa A.: *Rozmyty świat zbiorów, liczb, relacji, faktów, reguł i decyzji*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
- [11]. Marecka–Chłopek E., Chłopek Z.: Pollutants emission problems from the combustion engines of other applications than motor cars. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* Nr 3 (35)/2007. 81–85.
- [12]. Wang J., Storey J., Domingo N., Huff S., Thomas J., West B.: Studies of diesel engine particle emissions during transient operations using an engine exhaust particle size. *Aerosol Science and Technology*. Volume 40, Issue 11. November 2006. 1002–1015.
- [13]. Zieliński T.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1999.