Zdzisław Chłopek
Politechnika Warszawska
Tomasz Szczepański
Instytut Transportu Samochodowego

METODA OCENY UŻYTKOWYCH WŁAŚCIWOŚCI SILNIKA SPALINOWEGO W STANACH DYNAMICZNYCH

Artykuł omawia pięć podstawowych problemów, związanych z analizą pracy silnika spalinowego w stanach dynamicznych. Są to: przesunięcia fazowe w poszczególnych torach pomiarowych laboratorium hamownianego, operatorowe zależności pomiędzy parametrami wejściowymi i wyjściowymi silnika, wielowymiarowa dziedzina zależności pomiędzy parametrami pracy silnika, niepowtarzalność stanów pracy silnika dla zadanych warunków jego pracy, trudności z wizualizacją zależności pomiędzy wieloma parametrami pracy silnika. W pracy proponuje się rozwiązania powyższych problemów, co prowadzi w konsekwencji do opracowania metody obliczeniowej służącej do oceny użytkowych właściwości silnika w stanach dynamicznych. Wszystkie proponowane rozwiązania przeanalizowano również w praktyce, na podstawie wyników trzech testów hamownianych. Każdy test był wykonany kilkukrotnie i dla każdej jego realizacji wykonano niezależne obliczenia. Pozwoliło to na ocenę powtarzalności wniosków formułowanych na podstawie badań za pomocą prezentowanej metody, a tym samym na weryfikację słuszności przedstawianych rozważań.

METHOD OF EVALUATING ENGINE USABLE PROPERITIES IN DYNAMIC STATES

The paper discusses the five basic problems associated with the analysis of combustion engine work in dynamic states. Discussed problems: the phase shifts in each measurement tracks in the dynamometer laboratory, operator relationships between input and output engine parameters, multidimensional relation field between engine work parameters, unrepeatability of engine working states in imposed working conditions, difficulties with visualization the relationship between the number of engine working parameters. The solutions of this five problems are suggested and it provide to compile the calculation method to evaluate usable properties of engine in dynamic states. All proposed solutions are analyzed also in practice, based on the results of the three dynamometer tests. Each test was performed several times and then for each one independent calculations was done. Thereby it was possible to estimate repeatability of conclusions that was drawn from research using presented method. This way it was possible to verify the equity of presented considerations.

1. Wprowadzenie

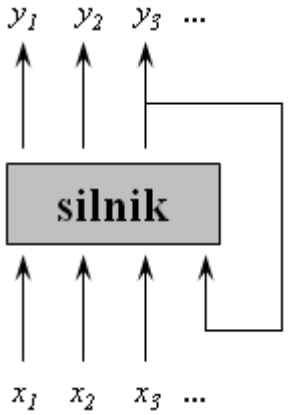
W czasie rzeczywistej pracy silnika spalinowego, wykorzystywanego do napędu samochodów, proces jego pracy ma zwykle charakter dynamiczny [15, 18]. Warto również zauważyć, że badanie silników w stanach dynamicznych wymaga zastosowania specjalnej aparatury [14, 17], a także wymaga analizy problemów o dużej złożoności. Istnieje bowiem wiele czynników, wpływających na przebieg procesów dynamicznych, kształtujących zarówno warunki pracy silnika, jak i stany jego pracy [3, 20]. Ponadto wyniki pomiarów często są obarczone dużą niepowtarzalnością [6, 16], co utrudnia interpretację wyników i wyciąganie jednoznacznych wniosków z prowadzonych badań.

Niniejszy artykuł stanowi przegląd podstawowych problemów, które utrudniają badania silników spalinowych w stanach dynamicznych wraz z propozycjami rozwiązania owych trudności. Został on przygotowany w oparciu o treść rozprawy doktorskiej obronionej na Politechnice Warszawskiej w 2015 roku [11].

1.1. Prezentacja stosowanych pojęć

1.1.1. Stan pracy i warunki pracy silnika

W prezentowanych rozważaniach silnik spalinowy jest modelowany jako obiekt automatyki (rys. 1.1.). Można w nim wyróżnić parametry wejściowe i wyjściowe. Ogół parametrów wejściowych został nazwany warunkami pracy silnika (opisującymi czynniki niezależne od silnika), a ogół parametrów wyjściowych stanem pracy silnika (opisującym czynniki wynikające z procesów roboczych pracy silnika).



Rys. 1. Model silnika
Fig. 1. Engine model

Formalnie rzecz ujmując, stan pracy silnika powinien być zdefiniowany za pomocą parametrów reprezentujących procesy robocze zachodzące wewnątrz silnika (jak na przykład ciśnienie i temperatura czynnika roboczego, albo nastawy urządzeń sterujących silnikiem). Jednak w wielu procedurach badawczych tego typu wielkości nie są mierzone i rejestrowane. W takich przypadkach o parametrach roboczych można wnioskować jedynie pośrednio, na podstawie takich wielkości fizycznych, jak: natężenie emisji poszczególnych składników spalin, albo moment obrotowy silnika.

1.1.2. Proces statyczny i proces dynamiczny

Ze względu na fakt, że każdy parametr odpowiada określonemu procesowi, stan pracy również tworzy proces. Będzie on nazywany procesem stanu. Podobnie warunki pracy są procesem warunków. Zarówno proces stanu, jak i proces warunków są procesami wielowymiarowymi.

Każdy taki proces może być statyczny lub dynamiczny, przy czym za statyczny uważa się taki proces, którego wartości nie zmieniają się w czasie, po uprzednim zastosowaniu odpowiedniego filtra dolnoprzepustowego. Zadaniem filtra jest wówczas wyeliminowanie zjawisk szybkozmiennych (na przykład związanych z obiegiem roboczym), które nie są interesujące w danych badaniach. Proces, w którym choć jeden parametr zmienia się w czasie jest procesem dynamicznym.

1.1.3. Stan statyczny i dynamiczny oraz warunki statyczne i dynamiczne

Rozpatrując proces stanu oraz proces warunków w pojedynczej chwili czasu, mówi się o stanie pracy oraz o warunkach pracy silnika. Stan pracy jest statyczny, kiedy pochodne wszystkich parametrów są równe lub bliskie zeru. Podobnie definiuje się warunki statyczne. Stany i warunki pracy silnika nie spełniające powyższego warunku są nazywane stanami dynamicznymi i warunkami dynamicznymi.

1.1.4. Użytkowe właściwości silnika spalinowego

W prezentowanym modelu silnik przetwarza parametry wejściowe (wymuszenie układu) na parametry wyjściowe (odpowiedź układu). Odpowiedzi układu na zadane wymuszenie zależy od właściwości samego silnika. Dlatego użytkowymi właściwościami silnika są nazywane zależności pomiędzy parametrami wyjściowymi, a wejściowymi.

2. Istniejące publikacje

Tematyka związana ze stanami dynamicznymi silnika spalinowego nie jest oczywiście nowa, choć nie istnieje zbyt wiele publikacji na ten temat [8]. Piśmiennictwo w tym zakresie można pogrupować według następujących kategorii tematycznych.

- Podstawy teoretyczne. W tej grupie tematycznej znajdują się prace poświęcone definicji pojęć, metod badawczych oraz urządzeń do przeprowadzenia badań w warunkach dynamicznych. Można tutaj również znaleźć omówienie wielu problemów związanych z badaniami silników w tym zakresie [5, 16, 3, 14].
- Porównanie stanów statycznych i dynamicznych. Prace poruszające ten temat są szczególnie interesujące. Wynikają z nich bowiem dwa istotne wnioski stanowiące uzasadnienie podejmowania problemu badań stanów dynamicznych pracy silnika:
  - w rzeczywistej eksploatacji silnik pracuje znacznie częściej w stanach dynamicznych [15, 18],
  - właściwości silnika w stanach dynamicznych i statycznych różnią się od siebie [1, 2].
- Badania w testach dynamicznych. W tego typu badaniach znajdujemy dość charakterystyczne podejście, ponieważ silnik w czasie testu faktycznie pracuje w stanach dynamicznych, ale jako wynik testu interpretowana jest jedynie sumaryczna (lub średnia) wartość emisji wybranych składników spalin. Badania te nie podejmują problemu właściwości silnika w poszczególnych stanach [7].

- Modelowanie pracy silnika lub jego części w stanach dynamicznych. Prace naukowe w tej kategorii tematycznej skupiają uwagę na poszczególnych procesach roboczych pracy silnika i odnoszą je do warunków dynamicznych [4].
- Analiza pracy silnika w wybranych stanach dynamicznych. W tych publikacjach wybierany jest zbiór stanów dynamicznych (na przykład tworzących proces swobodnego rozpędzania silnika), dla którego przeprowadza się szczegółową analizę właściwości silnika [16].

Podsumowując istniejące publikacje, można powiedzieć, że brakuje prac, opisujących kompleksowo to zagadnienie, zawierających systematyczny przegląd stanów dynamicznych, omawiających parametry pracy silników w poszczególnych stanach, czy próbujących opisać ogólne zależności zauważalne w całościowym spojrzeniu na poszczególne stany dynamiczne.

Próba kompleksowego ujęcia problemu stanów dynamicznych pracy silnika wiąże się jednak z kilkoma poważnymi problemami. W ramach pracy, na której oparto niniejszy artykuł, podjęto próbę identyfikacji tych problemów oraz wysunięcia propozycji ich rozwiązania. W konsekwencji powstała metoda obliczeniowa służąca do oceny użytkowych właściwości silnika spalinowego w stanach dynamicznych.

3. Podstawowe problemy

Zauważono następujące problemy związane z kompleksowym ujęciem stanów dynamicznych pracy silnika.

- Przesunięcia fazowe w torach pomiarowych w laboratorium hamownianym. Jest to związane z faktem, że niektóre wielkości fizyczne są mierzone i rejestrowane z pomijalnie małym opóźnieniem, natomiast wielkości wymagające analizy spalin są rejestrowane z opóźnieniem wynikającym z przepływu spalin przez układ ich poboru. Największa trudność wiąże się ze zmiennością tego opóźnienia w czasie, ponieważ czas przepływu spalin przez układ poboru zależy od natężenia emisji spalin przez silnik, a ta wielkość zależy od zmiennego stanu pracy silnika [19].
- Operatorowy charakter zależności pomiędzy parametrami pracy silnika. Oznacza to, że wartości parametrów wyjściowych w chwili bieżącej zależą nie tylko od bieżących wartości parametrów wejściowych, ale również od wartości w chwilach poprzednich. Argumentem zależności są więc nie pojedyncze wartości liczbowe parametrów wejściowych, ale całe ich przebiegi. Taka zależność bywa niemożliwa do opisania [10, 13].
- Wielowymiarowe zależności pomiędzy parametrami pracy silnika. Liczba parametrów wejściowych bywa stosunkowo duża w modelach opisujących pracę silnika. Problem ten dodatkowo komplikuje się w przypadku wprowadzenia wielkości opisujących zmienność warunków pracy silnika. To sprawia, że dziedzina rozpatrywanych zależności jest wielowymiarowa [9].
- Niepowtarzalność wartości parametrów opisujących pracę silnika. W podobnych warunkach pracy silnik może znajdować się w różnych stanach pracy. Jest to efektem zjawisk przypadkowych występujących zarówno w procesie pracy silnika, jak i w procesie pomiaru. Często jednak niepowtarzalność wyników jest efektem niedoskonałości analizy wyników. Istnieje więc potrzeba oceny przyczyn niepowtarzalności [12].
- Trudności związane z wizualizacją istniejących zależności. Pozornie może się wydawać, że problem wizualizacji jest w niewielkim stopniu związany

z podejmowanym tematem. Jednak bez możliwości prezentacji zależności pomiędzy parametrami pracy silnika nie jest możliwa ocena jego właściwości użytkowych. Dlatego jest to dość istotny problem, a staje się trudny wobec wielowymiarowej dziedziny analizowanych zależności [5].

4. Weryfikacja metody

Aby proponowana metoda obliczeniowa analizy wyników badań nie pozostawała w sferze abstrakcji, należało zweryfikować jej przydatność do oceny użytkowych właściwości silnika w stanach dynamicznych. W tym celu posłużono się wynikami trzech testów dynamicznych:

- Autobahn,
- FTP-75,
- Stop&Go.

Dla każdego testu można przeprowadzić obliczenia za pomocą proponowanej metody. Powstał jednak problem porównania i oceny jakości wyników. Nie istnieją bowiem wzorcowe wyniki tego typu obliczeń, które pozwoliłyby na weryfikację poprawności wyliczeń.

Z tego powodu wykorzystano po cztery realizacje każdego z powyższych testów i przeprowadzono tok obliczeniowy osobno dla każdej z nich. Weryfikacja metody odbywała się wówczas na podstawie oceny powtarzalności wyników obliczeń w ramach czterech realizacji każdego testu.

5. Omówienie podstawowych problemów oraz proponowanych rozwiązań

W ramach prezentowanych rozważań zaproponowano metodykę postępowania podczas analizy wyników badań hamownianych silnika w stanach dynamicznych. W niniejszym rozdziale przedstawiono poszczególne etapy obliczeń, odpowiadające rozwiązaniom problemów zidentyfikowanych w rozdziale 3. Przykładowe obliczenia praktyczne wykonano na podstawie stosownych badań. Wybrane (najbardziej reprezentatywne) wyniki obliczeń zaprezentowano poniżej w formie graficznej.

5.1. Korekcja przesunięć fazowych

Jeżeli rozpatrzymy dowolny parametr wyjściowy (y_x) z modelu, można zauważyć, że jego przebieg jest funkcją nie tylko czasu (t), ale również opóźnienia (T) (wzór 5.1.).

$$y_x = y_x(t + T) \tag{5.1.}$$

Wielkość tego opóźnienia zależy między innymi od czasu przepływu spalin przez układ ich poboru, a to zjawisko jest z kolei zależne od natężenia emisji spalin V_s (wzór 5.2.).

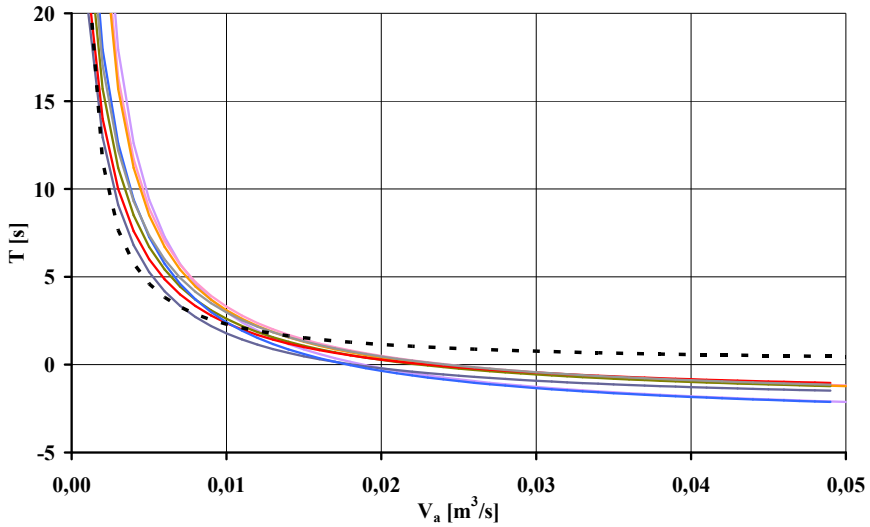
$$T = T(V_s) \tag{5.2.}$$

Kluczowym zadaniem, koniecznym do przeprowadzenia korekcji przesunięć fazowych, jest zatem wyznaczanie zależności $T(V_s)$. Wykorzystano w tym celu dwie metody:

- modelowanie zjawisk przepływowych w układzie poboru spalin,
- analiza funkcji korelacji krótkich fragmentów przebiegów mierzonych parametrów.

Obydwie metody nie zostaną szczegółowo omówione w niniejszym artykule (zainteresowany Czytelnik może sięgnąć do literatury [11]). Warto jednak zauważyć, że pierwsza metoda analizuje zjawiska fizyczne stanowiące przyczyny przesunięć, a druga skupia się na efektach tych zjawisk zarejestrowanych w wynikach pomiarów – metody te mają więc całkowicie odmienny charakter. Jeśli więc zaistnieje zgodność pomiędzy wynikami obydwu metod, będzie to pewną przesłanką do uznania ich poprawności.

Na rys. 5.1. przedstawiono porównanie poszukiwanej zależności $T(V_s)$, wyznaczonej za pomocą obydwu metod. Linia kreskowa odpowiada pierwszej metodzie, a linie ciągłe drugiej (zastosowanej dla różnych realizacji testu Autobahn).



Rys. 5.1. Porównanie różnych metod wyznaczenia zależności $T(V_s)$
Fig. 5.1. Comparison of different methods of depending $T(V_s)$ designate

Na powyższym wykresie widoczna jest ogólna zgodność pomiędzy wynikami dwóch metod, jak również ogólna powtarzalność pomiędzy obliczeniami prowadzonymi dla poszczególnych realizacji testu Autobahn. Widoczne są również pewne rozbieżności, które obrazują wielkość niepewności obliczeniowej dla proponowanego toku obliczeń.

Zastosowanie korekcji przesunięć fazowych na podstawie tak wyznaczonej zależności $T(V_s)$ przyniosło w większości przypadków korzystne rezultaty. Miarą korzystności korekcji było zwiększenie współczynnika korelacji dla analizowanych przebiegów. Brak synchronizacji pomiędzy poszczególnymi wartościami przebiegów powinien bowiem uprzednio zmniejszyć korelację, a więc po przywróceniu (choć częściowym) synchronizacji należy się spodziewać, że wzajemna korelacja zostanie zwiększona.

5.2. Zależności operatorowe i funkcyjne

Zależności operatorowe pomiędzy parametrami wyjściowymi i wejściowymi oznaczają, że bieżące wartości parametrów wyjściowych zależą od całych przebiegów parametrów wejściowych. Jeśli w przykładowym modelu przyjąć, że parametrami wejściowymi będą: prędkość obrotowa (n), moment hamujący (M_r) i sterowanie (s), a parametrem wyjściowym będzie natężenie emisji wybranego składnika spalin (E_x), to przykładową zależność operatorową (F_x) opisuje wzór 5.3.

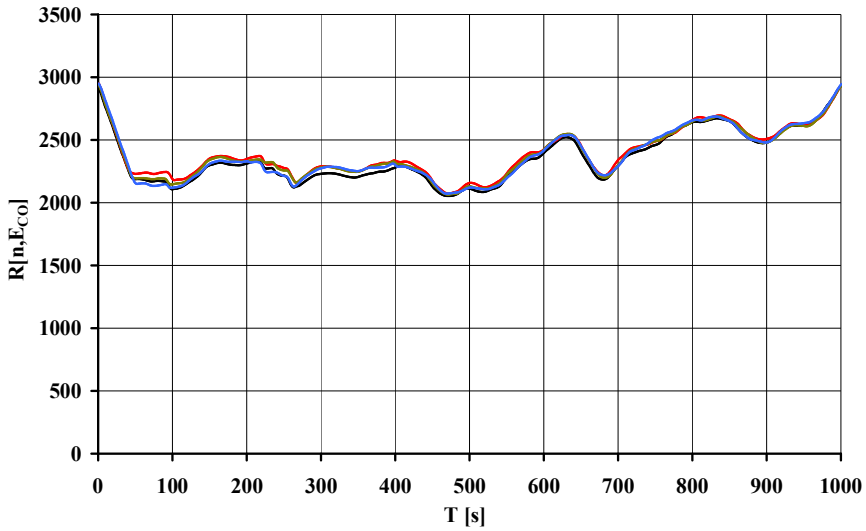
$$E_x(t) = F_x[n(t), M_r(t), s(t)] \qquad (5.3.)$$

W ramach uproszczenia tej zależności proponuje się w odniesieniu do argumentów zależności zastąpienie przebiegów parametrów wejściowych za pomocą ich wartości liczbowych odpowiadających chwili bieżącej oraz wartości liczbowych pochodnych parametrów wejściowych odpowiadających chwili bieżącej. Taka postać argumentów wciąż niesie w sobie informację o zmienności procesu (w danej chwili bieżącej), ale pomija wpływ wartości parametrów w chwilach wcześniejszych. Zmodyfikowaną zależność przedstawia wzór 5.4.

$$E_x(t_b) = f_x(n(t_b), n'(t_b), Mr(t_b), Mr'(t_b), s(t_b), s'(t_b)) \qquad (5.4.)$$

Takie uproszczenie powoduje oczywiście utratę dużej ilości informacji. Powstaje w związku z tym pytanie, czy utracone informacje nie wpływały w znaczący sposób na wartości parametrów wyjściowych. Inaczej mówiąc, należy zastanowić się, czy wartości parametrów wejściowych wcześniejsze od bieżących nie miały istotnego wpływu na wartości bieżące parametrów wyjściowych. Z pomocą w odpowiedzi na to pytanie przychodzi analiza funkcji korelacji wzajemnej.

Przykładową, reprezentatywną zależność tego typu przedstawiono na rys. 5.2. Stanowi ona funkcję korelacji wzajemnej obliczoną dla przebiegów: prędkości obrotowej silnika i natężenia emisji tlenku węgla. Dziedziną funkcji jest względne przesunięcie fazowe analizowanych przebiegów. Widoczne na wykresie cztery linie odpowiadają czterem realizacjom testu Autobahn. Stopień, w jakim cztery linie pokrywają się, ilustruje powtarzalność obliczeń dla poszczególnych realizacji testu.



Rys. 5.2. Wykres funkcji korelacji R[n(t), E_{CO}(t)] w dziedzinie przesunięć czasowych T dla czterech realizacji testu Autobahn

Fig. 5.2. The graph of correlation function R[n(t), E_{CO}(t)] in the field of time shifts T for four Autobahn test realizations

Przesunięcia o wartościach 0 s i 1000 s odpowiadają powiązaniu wartości bieżącej parametru wejściowego z wartością bieżącą parametru wyjściowego. Jak widać, w tym przypadku powiązanie jest największe. Specyfika obliczania funkcji korelacji nie pozwala, żeby wartości dla innych argumentów były bliskie zeru, ale ich wyraźny spadek świadczy o tym, że mają one zdecydowanie mniejszy wpływ na wartości bieżące parametrów wyjściowych. Stanowi to pewne uzasadnienie rezygnacji z tych informacji, jako mniej powiązanych z wielkościami wyjściowymi [10].

W efekcie powyższego uproszczenia z zależności operatorowych otrzymuje się zależności funkcyjne, czyli takie, w których argumentami są wartości liczbowe. Taka postać jest zdecydowanie prostsza do opisu matematycznego. Pewną trudnością jest jednak wielowymiarowość dziedziny tak zmodyfikowanej zależności. Liczba argumentów jest w tym przypadku dwukrotnie większa od liczby parametrów wejściowych w dotychczas analizowanym modelu silnika. Jest to więc kolejny problem wymagający rozwiązania [13].

5.3. Dziedzina zbiorów warunków

Jak to zasygnalizowano w poprzednim podrozdziale, jeśli oprócz wartości parametrów wejściowych wprowadzimy do modelu ich pochodne, liczba argumentów stanowiących dziedzinę badanych zależności będzie stosunkowo duża. Może to znacząco utrudnić analizę zależności, a tym samym ocenę użytkowych właściwości silnika. W celu rozwiązania tego problemu proponuje się przejście do dziedziny zbiorów.

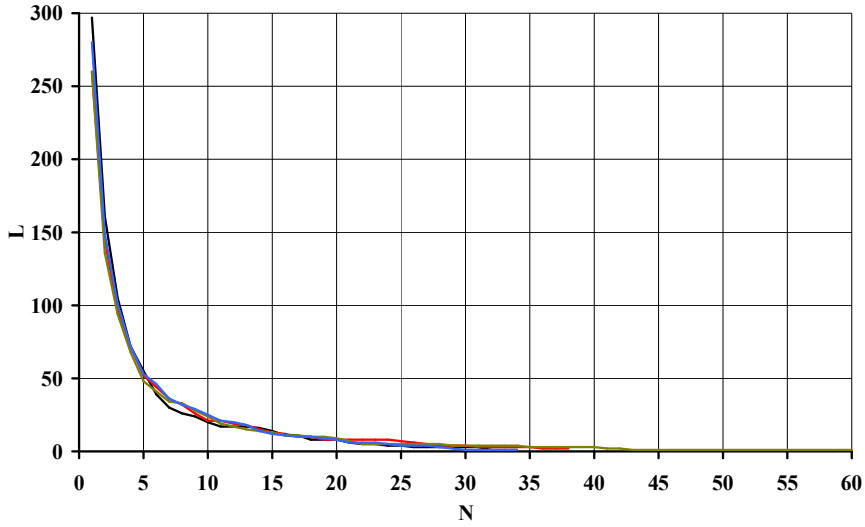
Dziedzinę zbiorów wprowadza się w następujący sposób:

- Zakres wartości każdego parametru można podzielić na przedziały. Wprowadzi to dyskretyzację wartości. Oznacza to, że od tej pory każdy parametr nie będzie już opisany daną wartością, ale przynależnością do jednego z kilku przedziałów.
- Zbiór warunków pracy silnika można wówczas zdefiniować za pomocą przynależności do kombinacji poszczególnych przedziałów.
- Ogół wszystkich tak zdefiniowanych zbiorów warunków będzie stanowił nową dziedzinę analizowanych zależności.

Oczywiście liczba tak wyznaczonych przedziałów będzie bardzo duża. Dla przykładowych wartości: sześciu parametrów wejściowych, z których każdy zostanie podzielony na pięć przedziałów, otrzymamy 15625 zbiorów. Analiza tak dużej liczby zbiorów byłaby równie kłopotliwa, jak poruszanie się w dziedzinie wielowymiarowej. Okazuje się jednak, że większość tak wyznaczonych zbiorów będzie pusta, zarejestrowane w czasie badań silnika warunki pracy rozłożą się w nielicznych zbiorach.

Do głównych zalet takiego rozwiązania należy zaliczyć fakt, że spośród niepustych zbiorów warunków można następnie wybrać tylko te, które w danych badaniach są najbardziej interesujące (na przykład występują najczęściej, albo charakteryzują się największą emisją wybranego składnika spalin).

Żeby zilustrować rozkład występujących stanów pracy w poszczególnych zbiorach warunków, na rys. 5.3. przedstawiono przykładową zależność liczności zbiorów od ich mocy (liczności elementów należących do danego zbioru).



Rys. 5.3. Zależność liczności zbiorów L o mocy nie mniejszej od N dla czterech realizacji testu Autobahn
Fig. 5.3. The dependence of the number of sets L with cardinality not less than N for four Autobahn test realizations

Widoczne na rys. 5.3. cztery linie odpowiadają wyznaczonej zależności L(N) dla czterech realizacji testu Autobahn. Zgodność widniejących na wykresie linii pokazuje powtarzalność wyników obliczeń prowadzonych dla poszczególnych realizacji testów jezdnych.

Jak widać, jeśli wybrać na przykład tylko te zbiory, w których znajduje się co najmniej pięć punktów pomiarowych (na osi argumentów N = 5), do dalszej analizy pozostanie jedynie pięćdziesiąt zbiorów. Jest to liczba zbiorów akceptowalna z punktu widzenia praktycznej możliwości ich analizy i prowadzenia dalszych obliczeń. Dla każdego z tak wybranych zbiorów warunków pracy silnika należy w dalszych obliczeniach ocenić właściwości użytkowe silnika.

5.4. Niepowtarzalność wyników badań

Niepowtarzalnością wyników jest w tym przypadków nazywane zjawisko, w którym do jednego zbioru warunków zostaną przyporządkowane różne stany pracy silnika. Wyróżniono dwie główne przyczyny takiej niepowtarzalności:

- zjawiska przypadkowe (zachodzące w pracy silnika lub w procesie pomiarowym),
- niedoskonałość analizy wyników.

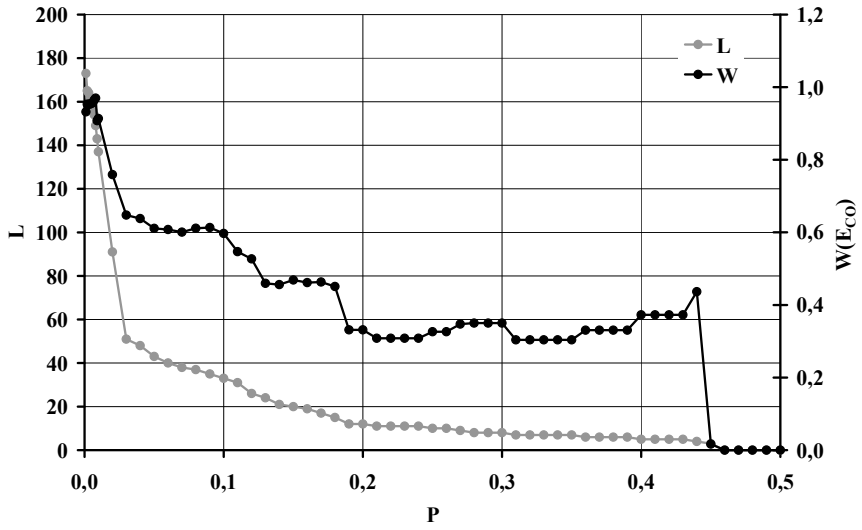
Pierwsza przyczyna niepowtarzalności wynika ze zjawisk występujących naturalnie w procesie pracy silnika oraz w procesie pomiarowym. Z tego względu na etapie analizy wyników badań nie należy tych zjawisk eliminować, a wręcz wskazane byłoby wyeksponowanie informacji, jaki udział w wynikach pomiarów mają zjawiska interpretowane jako przypadkowe.

Natomiast druga przyczyna niepowtarzalności powinna zostać zminimalizowana. Wynika ona głównie z faktu dyskretyzacji parametrów opisanej w poprzednim podrozdziale. Wymaga to bowiem podziału na przedziały o skończonej wielkości, co umożliwia zakwalifikowanie do jednego przedziału dwóch różnych wartości. W efekcie do

tak powstałego zbioru warunków mogą zostać zaliczone różne warunki pracy silnika odpowiadające różnym stanom jego pracy.

Konieczna jest zatem ocena, w jakim stopniu przyczyną zjawiska niepowtarzalności są procesy przypadkowe, a w jakim stopniu niedoskonałość analizy wyników badań. W tym celu proponuje się wykorzystać teorię zbiorów rozmytych. W najprostszym przypadku zbiór rozmyty można sobie wyobrazić jako zbiór o zmiennej wielkości. Wraz ze zwiększaniem wielkości zbioru warunków pracy silnika, zostanie do niego zakwalifikowanych więcej elementów (stanów pracy silnika), ale będą one bardziej zróżnicowane. W przypadku zmniejszania zbioru nastąpi efekt odwrotny – liczba zakwalifikowanych stanów będzie mniejsza, ale będą one bardziej zbliżone do siebie, a więc będą się charakteryzowały mniejszą niepowtarzalnością.

Na rys. 5.4. przedstawiono zmianę parametru niepowtarzalności W_{Eco} (będącą niepowtarzalnością natężenia emisji tlenku węgla) zależną od parametru P, reprezentującego zmniejszanie się wielkości zbioru. Jest to dość typowy przypadek, w którym w miarę zmniejszania zbioru niepowtarzalność z początku maleje, a następnie stabilizuje się na pewnym poziomie. Ten poziom reprezentuje tę część niepowtarzalności, która wynika ze zjawisk przypadkowych, których nie da się wyeliminować poprzez zawężanie zbioru. Natomiast ta część niepowtarzalności, której udało się uniknąć, miała swoją przyczynę w niedoskonałości przyporządkowania do jednego zbioru [12].



Rys. 5.4. Wykres niepowtarzalności W natężenia emisji tlenku węgla E_{CO} oraz mocy zbioru L w dziedzinie wartości progowej P dla wybranego zbioru warunków pracy silnika

Fig. 5.4. The graph of unrepeatability W of carbon oxide emission intensity E_{co} and sets cardinality L in the field of threshold value P for selected set of engine operating conditions

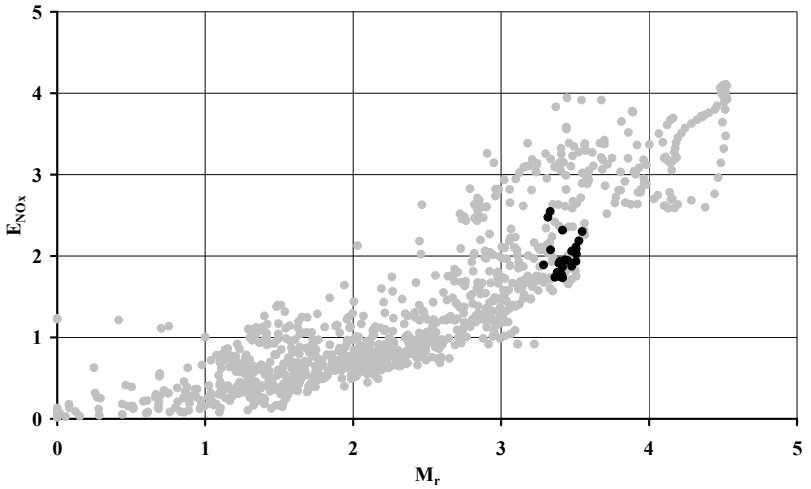
Na rys. 5.4. widnieje również linia oznaczona symbolem L. Odpowiada ona liczbie elementów zakwalifikowanych do rozpatrywanego zbioru. Oczywiście liczba ta maleje wraz ze zwiększaniem parametru P (a więc wraz ze zmniejszaniem zbioru). W przedziale argumentów, dla których wskaźnik niepowtarzalności W_{Eco} jest względnie stały liczba

elementów w zbiorze wciąż ulega stopniowemu zmniejszaniu. Oznacza to, że w tym przedziale niepowtarzalność jest niezależna od liczby elementów w zbiorze, co potwierdza wniosek, że niepowtarzalność w tym przypadku zależy od zjawisk przypadkowych, niezależnych od analizy wyników.

5.5. Wizualizacja zależności

W celu wizualizacji zależności zostały zaproponowane dwie metody. Pierwsza z nich przedstawia wybrany zbiór stanów pracy na tle wszystkich stanów pracy, jakie wystąpiły w danym badaniu. Można to przedstawić w dowolnych współrzędnych, w których na osi argumentów jest wybrany parametr wejściowy do modelu silnika, a na osi wartości dowolny parametr wyjściowy.

Na rys. 5.5. przedstawiono przykładowy wykres, obrazujący zależność pomiędzy natężeniem emisji tlenków azotu E_{NOx} od momentu hamującego obciążającego wał korbowy silnika. Jasne punkty na wykresie przedstawiają wszystkie wartości pomiarów natężenia emisji tlenków azotu, które zostały zarejestrowane w wybranej realizacji testu Autobahn, natomiast ciemne punkty reprezentują tylko te wartości, które wystąpiły w rozpatrywanym zbiorze stanów w danej realizacji testu.



Rys. 5.5. Wykres natężenia emisji tlenków azotu E_{NOx}
w dziedzinie momentu obrotowego silnika M_r dla wybranego zbioru stanów
oraz dla wszystkich stanów pracy silnika występujących w teście Autobahn
Fig. 5.5. The graph of nitrogen oxides emission intensity E_{nox}
in the field of torque M_r for selected states set
and for all engine work states occurring in the Autobahn test

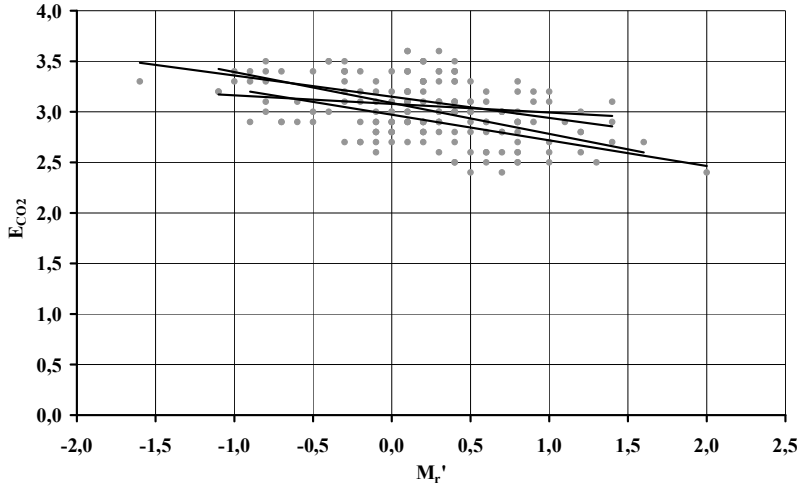
Taki sposób ilustracji wyników pozwala ocenić, jak kształtują się właściwości użytkowe silnika w wybranym zbiorze stanów w odniesieniu do wszystkich stanów, które występowały w danym teście jezdnym.

Druga metoda wizualizacji wyników polega na zestawieniu obok siebie kilku zbiorów stanów pracy silnika, które różnią się między sobą wartościami tylko jednego parametru (spośród parametrów wejściowych). Wybrany parametr wejściowy powinien znajdować

się na osi argumentów. Na osi wartości może zostać przyjęty dowolny parametr wyjściowy, którego zależność od wybranego parametru wejściowego będzie rozpatrywana.

Przykład takiej zależności pokazano na rys. 5.6. Widoczne na wykresie wartości odpowiadające różnym zbiorom stanów pracy silnika układają się w określony sposób, ukazując dzięki temu ogólną zależność pomiędzy wybranymi parametrami: wyjściowym i wejściowym. Zależność ta stanowi jednocześnie informację o danej właściwości użytkowej silnika w rozpatrywanych stanach pracy.

Widoczne na rys. 5.6. linie ciągłe są aproksymacjami przedstawianej zależności dla czterech realizacji testu jezdnego. Stopień pokrywania się poszczególnych linii 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.



Rys. 5.6. Wykres natężenia emisji dwutlenku węgla E_{CO2} w dziedzinie pochodnej momentu obrotowego M_r'
Fig. 5.6. The graph of carbon dioxide emission intensity E_{co2} in the field of derivative of torque M_r'

7. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych informacji można sformułować następujące uwagi podsumowujące:

- Silnik pracuje zazwyczaj w stanach dynamicznych.
- Właściwości silnika w stanach dynamicznych i statycznych różnią się.
- Celowa jest więc ocena użytkowych właściwości silnika w stanach dynamicznych.
- Próba takiej oceny w całościowym ujęciu napotyka jednak poważne problemy.
- Istnieją teoretyczne podstawy, aby stwierdzić, że problemy te można rozwiązać.
- Proponowane w artykule rozwiązania stanowią spójną metodę obliczeniową, prowadzącą od wyników pomiarów laboratoryjnych do wykresów reprezentujących właściwości użytkowe silnika w stanach dynamicznych.

- Istnieje zasadnicza powtarzalność wyników obliczeń dla kolejnych realizacji poszczególnych testów jezdnych, co może stanowić podstawę do pozytywnej weryfikacji prezentowanej metody.

Prezentowana metoda oceny użytkowych właściwości silnika spalinowego w stanach dynamicznych stanowi próbę kompleksowego ujęcia tych stanów. Może posłużyć do usystematyzowania stanów pracy silnika występujących w wybranych warunkach, oceny które spośród istniejących stanów są najbardziej niebezpieczne z punktu widzenia ekologicznego lub ekonomicznego oraz do analizy, jak kształtują się właściwości silnika w poszczególnych warunkach. Istnieje również możliwość dalszego wykorzystania omawianej metody do tworzenia testów jezdnych zorientowanych na pracę silnika w takich warunkach, w których charakteryzuje się on określonymi właściwościami.

LITERATURA

[1] 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.

[2] Chłopek Z.: Analiza emisji zanieczyszczeń z trakcyjnego silnika spalinowego, Mechanics and Mechanical Engineering 1/2005. Volume 9. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej. Łódź 2005. Ss. 43–68.

[3] Chłopek Z.: Metody badań właściwości silników spalinowych w warunkach przypadkowych modelujących użytkowanie, Archiwum Motoryzacji 4/2010, ss. 187-210.

[4] Chłopek Z.: Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych, Prace Naukowe. Seria „Mechanika" z. 173, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1999.

[5] Chłopek Z.: Uwagi do badań silników spalinowych w stanach dynamicznych, Silniki spalinowe nr 4/2010.

[6] 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.

[7] Chłopek Z., Rostkowski J.: Testy dynamiczne do badań emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych, The Sixth International Symposium „Combustion Engines in Military Applications", Jurata 2003.

[8] Chłopek Z., Szczepański T.: Aktualny stan wiedzy i prowadzone badania na temat dynamicznych stanów pracy silników spalinowych, Materiały XIII Konferencji Szkoleniowej Badania Techniczne Pojazdów w Świetle Obowiązujących Przepisów – 2012, Wydawnictwo „GARMOND", na zlecenie Instytutu Transportu Samochodowego, Warszawa 2012, ss. 125-143.

[9] Chłopek Z., Szczepański T.: Badanie właściwości użytkowych silników spalinowych w stanach dynamicznych, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów 1(92)/2013, ss. 47–56.

[10] Chłopek Z., Szczepański T.: Correlation research of combustion engines properties in dynamic states, V International Congress on Combustion Engines 2013, Combustion Engines 2013.

[11] Chłopek Z., Szczepański T.: Metoda oceny użytkowych właściwości silnika spalinowego w stanach dynamicznych – rozprawa doktorska, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2015.

[12] Chłopek Z., Szczepański T.: Ocena zjawiska niepowtarzalności wyników pomiarów w zbiorach dynamicznych stanów pracy silnika spalinowego, Materiały XIV Konferencji Szkoleniowej Badania Techniczne Pojazdów w Świetle Obowiązujących Przepisów – 2013, Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa 2013, ss. 139-154.

[13] Chłopek Z., Szczepański T.: Research concept of the combustion engines properties in dynamic states, V International Congress on Combustion Engines 2013, Combustion Engines 2013.
[14] Cichy M.: Nowe metody badawcze silników spalinowych i środki techniczne ich realizacji, grant badawczy KBN, 1995-1998.
[15] Longwic R.: Analiza procesu ciśnienia indykowanego silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach nieustalonych, Monografia. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2005.
[16] Longwic R.: Charakterystyka działania silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach swobodnego rozpędzania, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2011.
[17] Mamala J., Jantos J.: Stanowisko dynamiczne do badań układu pojazd - silnik techniką symulacji stanowiskowej, VI Międzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna AUTOPROGRES'98, Jachranka 1998, ss. 19-27, 1998.
[18] Rakopoulos C., Giakoumis E.: Diesel Engine Transient Operation - Principles of Operation and Simulation Analysis, Wydawnictwo Springer 2009.
[19] Voos W.: Dynamic engine testing, Paper No. 920254, Wydawnictwo SAE 1992.
[20] 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 szer., Aerosol Science and Technology. Volume 40, Issue 11. November 2006.