

OPRACOWANIE METODY OCENY WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH W STANACH DYNAMICZNYCH

W pracy zwrócono uwagę na trudności związane z badaniem właściwości użytkowych silników spalinowych w laboratorium hamownianym w stanach dynamicznych. Stosowane powszechnie testy dynamiczne prowadzą do wyników w postaci uśrednionej w czasie dla całego testu, co uniemożliwia analizę właściwości silników w poszczególnych stanach pracy. Jednym z głównych problemów w tym zakresie jest brak synchronizacji wyników pomiarów pochodzących z różnych torów pomiarowych. W pracy zaproponowano metodę pozwalającą na minimalizację przesunięć fazowych wyników pochodzących z poszczególnych torów.

(z pracy ITS nr 6303/ZDO)

1. Wprowadzenie

Przez wiele lat silniki spalinowe były badane przede wszystkim w stanach statycznych. Badania w stanach dynamicznych dotyczyły zazwyczaj bardzo szczegółowych warunków, np. badanie zadymienia spalin przy swobodnym przyspieszaniu [20]. Świadomość faktu, że właściwości silników spalinowych są silnie zależne od występowania stanów dynamicznych skłania do coraz bardziej szczegółowego rozpatrywania badań odbiegających od powszechnie stosowanych standardów w stanach statycznych. Klasycznym przykładem takich badań są badania emisji zanieczyszczeń w warunkach testów jezdnych [21] oraz w dynamicznych testach na hamowni silnikowej [20]. Są to badania, które umożliwiają poznanie właściwości silników w stanach dynamicznych, przy czym właściwości te są uśrednione dla warunków całego testu. Tradycji bardziej wnikliwych badań w szczegółowo opisanych stanach dynamicznych w zasadzie nie ma. Ogólnie badania silników w stanach dynamicznych dotyczą zazwyczaj albo swobodnego przyspieszenia, albo testów o przebiegach wielkości, determinujących stan pracy silnika. Tylko w nielicznych przypadkach pojawiają się publikacje, zawierające bardziej szczegółowe wyniki [1-19].

Jednym z poważniejszych problemów związanych z badaniem silników w stanach dynamicznych w laboratorium hamownianym jest brak synchronizacji wyników pochodzących z poszczególnych torów pomiarowych. Niniejszy artykuł przedstawia metodę obliczeniową pozwalającą na minimalizację występujących przesunięć fazowych w zarejestrowanych przebiegach poszczególnych wielkości mierzonych.

2. Przyczyny występowania przesunięć fazowych i ich korekcja

W laboratorium hamownianym poszczególne wielkości fizyczne są mierzone i rejestrowane w odrębnych torach pomiarowych. Taki układ wynika z odrębności charakteru poszczególnych wielkości fizycznych i konieczności wykonywania pomiaru różnymi metodami. Wiąże się to jednak z poważnym problemem. Każdy tor pomiarowo-rejestracyjny ma inny czas opóźnienia T , mierzony od chwili zaistnienia mierzonego zjawiska fizycznego do chwili jego zarejestrowania.

Największych różnic można się spodziewać między wielkościami mierzonymi na wale hamulca hamowni, a wielkościami wynikającymi z pracy analizatorów spalin. Na przykład prędkość obrotowa wału korbowego silnika n oraz moment obrotowy silnika M_e powinny charakteryzować się małym czasem opóźnienia. Za mały czas należy uznać taki, który jest dużo mniejszy od okresu próbkowania. Z kolei dużo większym czasem opóźnienia będą charakteryzowały się wyniki natężenia emisji E_x poszczególnych substancji x mierzonych w spalinach.

Największym problemem jest jednak nie tyle sam fakt opóźnienia, ale jego zmienność w trakcie trwania testów hamownianych. Warto zauważyć, że na opóźnienie wyników pomiaru natężenia emisji poszczególnych substancji w spalinach (w przypadku pomiaru spalin rozcieńczonych) wpływają następujące czynniki:

- a) czas przepływu spalin przez rurę wydechową,
- b) czas przepływu spalin przez przewody doprowadzające spaliny do przewodu o stałym natężeniu przepływu,
- c) czas przepływu spalin przez przewód o stałym natężeniu przepływu,
- d) czas analizy spalin oraz rejestracji wyników.

Istotnym jest fakt, że czynniki a) i b) są zmienne i zależne od natężenia emisji spalin. Tak więc czas opóźnienia jest funkcją natężenia emisji spalin V_s , zgodnie ze wzorem 2.1.

$$T = T(V_s) \quad (2.1.)$$

Powyższy problem nie byłby kłopotliwy, gdyby silnik poddać badaniu w stanach statycznych lub w sytuacji badań dynamicznych, kiedy badana byłaby jedynie sumaryczna emisja poszczególnych substancji dla danego testu. Jednak kiedy interesujące są poszczególne stany dynamiczne pracy silnika, istnieje potrzeba przyporządkowania poszczególnych wartości natężeń emisji zanieczyszczeń poszczególnym wartościom takich parametrów, jak prędkość obrotowa n czy moment obrotowy M_e . Takie przyporządkowanie nie jest jednak możliwe, ponieważ przebiegi $n(t)$ lub $M_e(t)$ nie odpowiadają wartościom $E_x(t)$ w przebiegach, ale wartościom $E_x(t + T(V_s))$.

Jako wynik testu otrzymuje się więc przebiegi $E_x(t)$ obciążone nieznanymi, zmiennymi przesunięciami fazowymi. Istnieje więc potrzeba znalezienia tych przesunięć i wprowadzenia odpowiednich korekcyj. Jak to wynika ze wzoru 2.1., czas zwłoki T jest funkcją natężenia emisji spalin V_s . Jeśli uda się wyznaczyć tę zależność, wprowadzenie korekcji będzie polegało na następującej procedurze. Posiadając w wynikach badań przebiegi $E_x(t)$ i $V_s(t)$, na podstawie $V_s(t)$ wyznaczamy przebieg $T(t)$. Następnie każdą wartość $E_x(t)$ zastępujemy wartością $E_x(t + T(t))$. W efekcie poszczególne wartości $n(t)$ lub $M_e(t)$ będą odpowiadały wartościom $E_x(t)$.

Jedynym problemem jest znalezienie zależności $T(V_s)$. W pracy zostały przygotowane dwie metody wyznaczania tej zależności, które zostaną omówione w rozdziałach 3. i 4.

3. Znajdowanie teoretycznej zależności $T(V_s)$ na podstawie przepływu spalin w przewodach

Obliczenie czasu przepływu spalin przez przewody jest możliwe na podstawie prawa ciągłości przepływu, które wprowadza zależność między objętościowym natężeniem przepływu V_s , prędkością przepływu v oraz polem przekroju przewodu A , którą przedstawia wzór 3.1.

$$V_s = v \cdot A \quad (3.1.)$$

Zgodnie z definicją prędkości powyższy wzór można przekształcić do postaci wyrażonej przez wzór 3.2., gdzie S_n oznacza długość kolejnego przewodu odpowiadającego zmiennemu

natężeniu przepływu, A_n jego pole przekroju, a T_c oznacza stałe opóźnienie w czasie, wynikające z przepływu przez przewody o stałym natężeniu przepływu oraz wynikające z czasu analizy spalin i rejestracji wyników.

$$T = \frac{1}{V_s} (S_1 \cdot A_1 + S_2 \cdot A_2 + \dots) + T_c \quad (3.2.)$$

Jest to więc funkcja hiperboliczna, gdzie wyrażenie w nawiasie odpowiada za aspekt zależny od natężenia przepływu, a wyrażenie T_c odpowiada za stałe opóźnienie w czasie. Mając szczegółową wiedzę na temat budowy stanowiska laboratoryjnego, można więc teoretycznie obliczyć wartości opóźnień, wynikających z poszczególnych natężeń przepływu spalin. Istotne informacje do wyznaczenia wartości T_c (jak natężenie przepływu w przewodach o stałym natężeniu przepływu, czas analizy spalin w poszczególnych analizatorach) powinny zostać podane przez producenta aparatury badawczej.

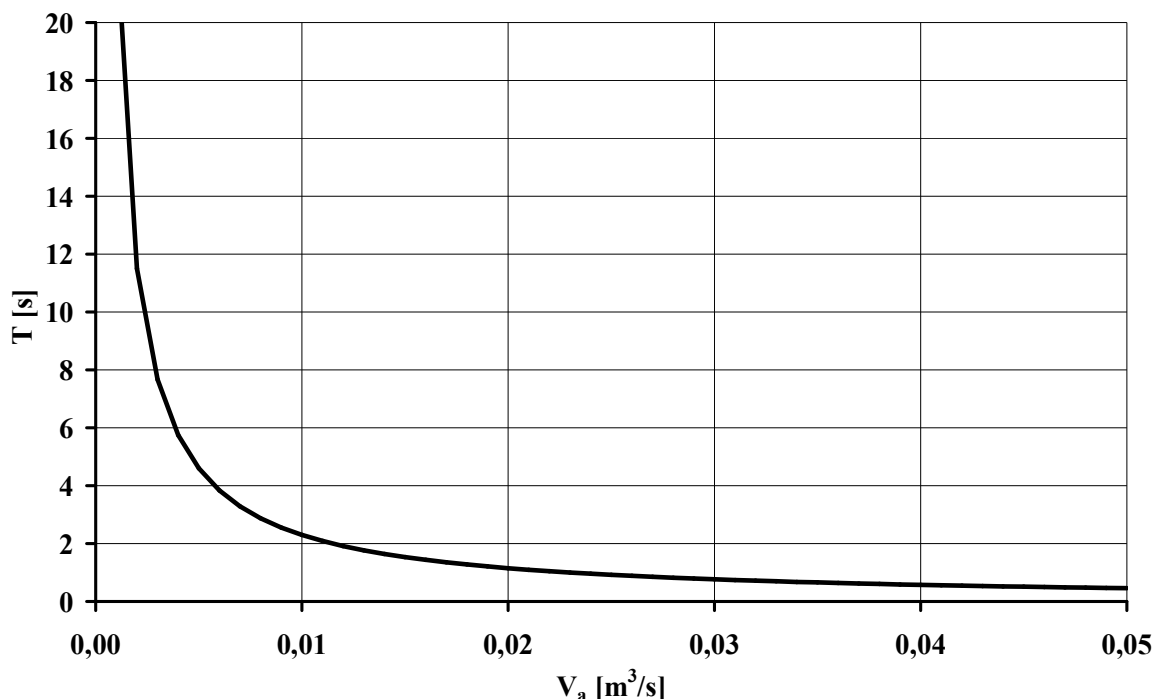
Duże trudności mogą jednak wystąpić podczas obliczania czasu przepływu przez układ wydechowy samochodu. Znajdują się tam bowiem elementy wprowadzające istotne opory przepływu (tłumik dźwięków, reaktor katalityczny, filtr cząstek stałych), które nie sposób opisać za pomocą wzoru 3.2. W prezentowanych obliczeniach teoretycznych nie jest więc możliwe uwzględnienie tej części zjawisk. Trzeba się wobec tego liczyć z faktem, że zależność $T(V_s)$ wyznaczona tą drogą przyniesie jedynie wartości przybliżone.

W celu wykonania przykładowych obliczeń zostały wykorzystane wyniki testu Autobahn, zrealizowanego czterokrotnie dla samochodu osobowego z silnikiem iskrowym. Do wyznaczenia poszukiwanej zależności został wykorzystany wzór 3.2. Zostały w tym celu zmierzone wymiary przewodów prowadzących spalinę (długości – S i pola przekroju – A), aby uzupełnić parametry zależności teoretycznej.

Trudnym problemem było oszacowanie wartości T_c , oznaczającej stałe przesunięcie w czasie, wynikające między innymi z czasu samej analizy spalin w analizatorach. Nie były bowiem dostępne dane producenta urządzenia, dotyczące tego tematu. Istnieje możliwość, że proces przetwarzania danych w urządzeniu sterującym wprowadza pewne stałe przesunięcia korygujące o nieznaną wartość. Ostatecznie T_c nadano wartość 0.

Kolejną niedogodnością był brak zarejestrowanego w wynikach badań natężenia przepływu spalin. Spośród zarejestrowanych parametrów pracy silnika najsilniej skorelowanym z tą wielkością było natężenie przepływu powietrza V_a . Dlatego we wzorze 3.2. wielkość V_s została zastąpiona przez V_a . Należy mieć świadomość, że zostały w ten sposób wprowadzone uproszczenia do metody obliczeniowej, która sama w sobie opiera się na uproszczonym modelu, opisującym zjawiska, zachodzące w układzie poboru spalin. Prowadzi to nieuchronnie do otrzymania wyników obciążonych dużą niepewnością, trudną do oszacowania. Podjęto jednak próbę oceny efektów zastosowania proponowanego rozwiązania.

W wyniku zastosowania metody teoretycznej, modelującej przepływ spalin w przewodach, otrzymano zależność $T(V_a)$, przedstawioną na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Zależność $T(V_a)$ otrzymana na podstawie modelowania przepływu gazów w układzie poboru spalin.

Źródło: opracowanie własne

4. Znajdowanie teoretycznej zależności $T(V_s)$ na podstawie krótkich funkcji korelacji

Ze wzoru 3.2. wynika, że zależność $T(V_s)$ ma postać funkcji hiperbolicznej. Można ją zatem wyrazić w postaci pokazanej we wzorze 4.1.

$$T(V_s) = \frac{a}{V_s} + b, \quad (4.1.)$$

gdzie a i b – stałe współczynniki, dobierane na drodze optymalizacji. Teoretycznie istnieje możliwość przeprowadzenia optymalizacji parametrów a i b tak, żeby doprowadzić do możliwie najlepszego powiązania pomiędzy przebiegami wielkości fizycznych, pomiędzy którymi występują przesunięcia fazowe. Kryterium optymalizacji mogłoby być wartość współczynnika korelacji wzajemnej tych dwóch przebiegów.

Ten sposób wyznaczenia zależności $T(V_s)$ charakteryzuje się kompleksowym modelowaniem zjawisk odpowiedzialnych za przesunięcia fazowe w poszczególnych torach pomiarowych. W praktyce jednak funkcja korelacji wzajemnej może się okazać bardzo niedoskonałym kryterium oceny. Wychwytuje ona bowiem wiele zjawisk okresowych, występujących w analizowanych przebiegach, i w odpowiadających im miejscach występują maksima lokalne, które czasami przewyższają nawet maksimum dla przesunięcia zerowego. W takiej sytuacji kryterium to byłoby bezużyteczne. Ograniczenie zakresu optymalizowanych współczynników a i b nie naprawi tego problemu, ponieważ funkcja opisująca kryterium optymalizacji nie musi mieć maksimum lokalnego w dziedzinie ograniczonej przez nas w sposób arbitralny. Wówczas otrzymane wartości a i b będą tożsame z przyjętymi granicami optymalizacji.

Proponowanym sposobem na ominięcie powyższych problemów jest zastosowanie optymalizacji jedynie dla krótkich przedziałów czasu. Należy w tym celu przeprowadzić następującą procedurę obliczeniową.

Jako parametr reprezentujący wielkość fizyczną nie obciążoną znacznymi przesunięciami fazowymi można wybrać prędkość obrotową n silnika, ponieważ jest ona zwykle dość silnie skorelowana z przebiegami natężenia emisji E_x . Dla każdego czasu t jest obliczana wartość funkcji korelacji między $n(t)$ i $E_x(t)$, ale nie dla całego przebiegu, tylko dla kilku sąsiadujących punktów pomiarowych. Wyraża to wzór 4.2.

$$R[n(t), E_x(t)] = \sum_{i=0}^m [n(t+i) \cdot E_x(t+i)], \quad (4.2.)$$

gdzie parametr m określa, dla ilu par punktów będzie obliczany współczynnik korelacji.

Tak obliczona wartość funkcji korelacji stanowi informację, jak bardzo prędkość obrotowa jest skorelowana z natężeniem emisji wybranej substancji x w spalinach na podstawie kilku sąsiadujących punktów. Oczywiście trzeba tę wartość porównać z wartością funkcji korelacji dla przebiegu $E_x(t)$ przesuniętego w fazie. Postać funkcji korelacji w dziedzinie przesunięć fazowych z wyraża wzór 4.3.

$$R[n(t), E_x(t+z)] = \sum_{i=0}^m [n(t+i) \cdot E_x(t+i+z)], \quad (4.3.)$$

Zakres wartości przyjmowanych przez parametr z powinien obejmować spodziewany zakres opóźnień czasowych, jakie mogą wystąpić w trakcie badań hamownianych. W ten sposób powstanie fragment funkcji korelacji wzajemnej (w dziedzinie z), obliczany nie dla całych przebiegów, ale dla kilku sąsiednich par punktów pomiarowych, gdzie liczba tych par jest równa wartości parametru m .

Przesunięcie fazowe z , dla którego wartość funkcji korelacji będzie największa, powinno stanowić poszukiwaną wartość zwłoki T . Wyznaczając wartość opóźnienia sygnału dla kolejnych chwil czasu, otrzymamy przebieg $T(t)$ opisujący zmienność czasu opóźnienia w czasie trwania testu. Tak wyznaczony przebieg można bezpośrednio wykorzystać do procedury korekcji opisanej w rozdziale 2. W celu porównania wyników tej metody z innymi metodami teoretycznymi, można również zestawzić przebieg $T(t)$ z przebiegiem $V_s(t)$ i wyznaczyć zależność $T(V_s)$.

Niestety trzeba się liczyć z możliwością bardzo dużej niepewności takich wyników. Wiąże się to z trudnościami w doborze parametru m , czyli liczby par punktów branych pod uwagę podczas obliczania wartości funkcji korelacji. Z jednej strony istotne jest, żeby parametr m był jak najmniejszy, ponieważ chcemy znaleźć opóźnienie dla bieżących wartości przebiegów, a nie dla wartości, które wystąpią kilka sekund później. Z drugiej strony zbyt mała wartość parametru m oznacza wyznaczanie wartości funkcji korelacji z bardzo małej liczby próbek, co w konsekwencji doprowadzi do przypadkowości wyników pod względem numerycznym. Tak więc zbyt mała wartość parametru m oznacza zwiększanie błędów analizy numerycznej, a zbyt duża wartość spowoduje zwiększanie błędów wynikających ze zjawisk fizycznych.

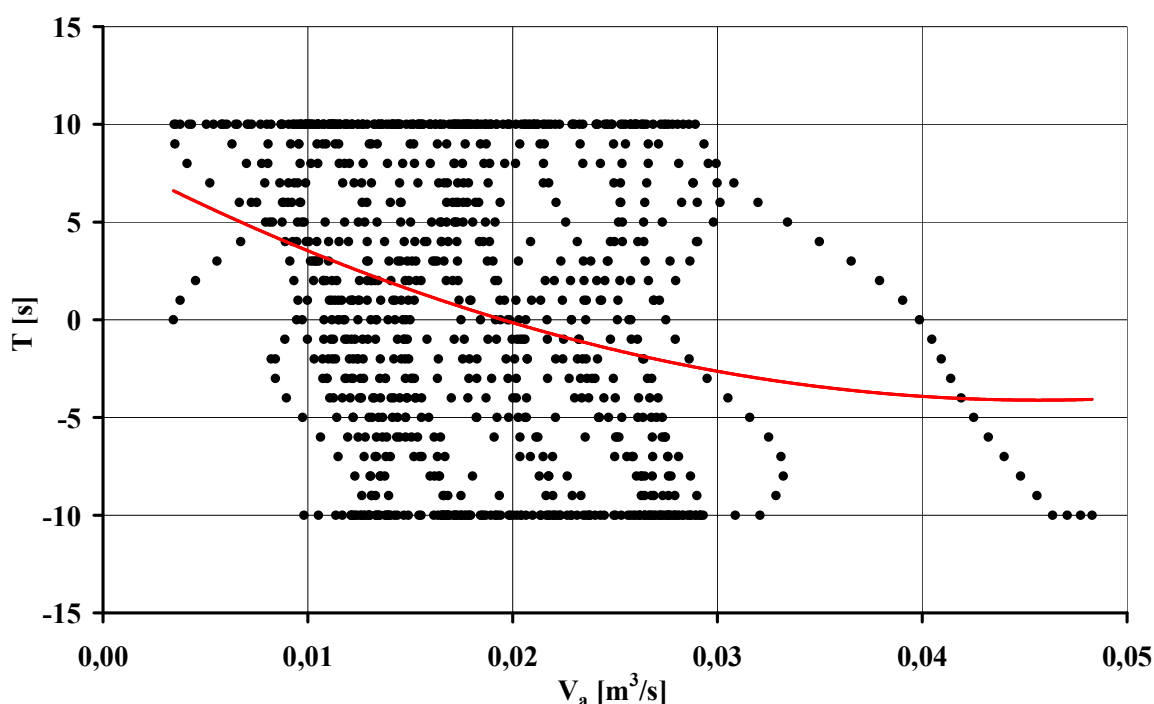
Spodziewana duża niepewność wyników powoduje dużą niejednoznaczność ich interpretacji. Nie wiadomo bowiem, czy tak wyznaczony przebieg $T(t)$ będzie wynikał z rzeczywistego opóźnienia toru pomiarowego analizy spalin, czy będzie efektem „szumu” powstałego z operacji numerycznych, prowadzonych z ograniczoną dokładnością. Należy się spodziewać, że efekt końcowy będzie wynikał z nałożenia na siebie tych dwóch zjawisk. W celu oceny wiarygodności wyników warto porównać je z wynikami otrzymanymi z pierwszej metody, sprawdzając, czy funkcje $T(V_s)$ przebiegają w obydwu przypadkach podobnie.

W celu przeprowadzenia przykładowych obliczeń wykorzystano te same wyniki pomiarów, co w rozdziale 3. Do obliczeń został wykorzystany wzór 4.3. Na podstawie analizy szybkozmienności zjawisk w wykorzystywanym teście Autobahn dobrano wartość parametru m równą 10 s. Zakres przesunięć w czasie funkcji korelacji odpowiadający

spodziewanym wartościom czasów zwłoki T ustalono na przedział od -10 do 10 s. Wartości ujemne dla czasu zwłoki przewidziano na wypadek, gdyby aparatura rejestrująca na stanowisku hamownianym wprowadzała pewne stałe przesunięcia korygujące. Wówczas dla małych rzeczywistych przesunięć, występujące w zarejestrowanych przebiegach przesunięcia byłyby ujemne.

Do obliczeń przyjęto przebieg prędkości obrotowej n (jako wzorcowy, nie mający przesunięć fazowych) oraz przebiegi: E_{NOX} i E_{CO2} (jako przebiegi obarczone przesunięciami fazowymi, a jednocześnie silnie skorelowane z n , aby analizowane współczynniki korelacji odnosiły się do zjawisk faktycznie występujących w analizowanych przebiegach).

Obliczenia wykonano zgodnie z opisanymi powyżej parametrami i na wspomnianych przebiegach, dla wszystkich czterech realizacji testu Autobahn. Nie wiadomo jednak, na ile przyjęte w tej metodzie kryterium oceny przesunięć (w postaci krótkich funkcji korelacji wzajemnej) wychwytuje poszukiwane przesunięcia fazowe w torach pomiarowych, a na ile zupełnie inne zjawiska. Aby to ocenić, zostały sporządzone wykresy zależności $T(V_a)$ dla wszystkich (ośmiu) obliczonych przebiegów $T(t)$. Przykładowy wykres został przedstawiony na rys. 4.1.



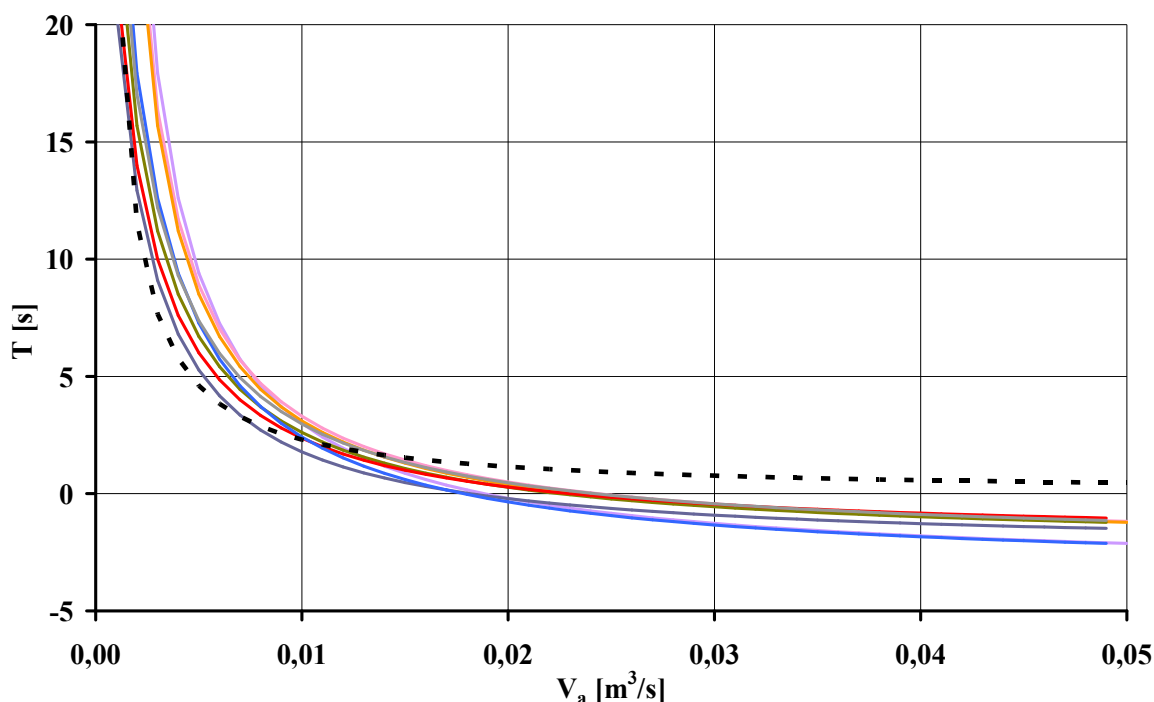
Rys. 4.1. Zależność $T(V_a)$ obliczona na podstawie krótkich korelacji przebiegów oraz $n(t)$ i $E_{NOx}(t)$

Źródło: opracowanie własne

Na powyższym wykresie widać bardzo dużą rozbieżność wartości T niemal w całym zakresie V_a . Świadczy to o silnym wpływie zjawisk nie związanych z przesunięciami fazowymi w torach pomiarowych na wartości T . Mimo wszystko, aproksymacja tej zależności za pomocą funkcji wielomianowej drugiego stopnia (widoczna na wykresie w postaci linii ciągłej) ma kształt zbliżony do oczekiwanej zależności $T(V_a)$, wynikającej z teoretycznych przyczyn przesunięć fazowych. Może to świadczyć, że oprócz informacji nieistotnych, odwzorowywanych przez zależność na powyższym wykresie (będących silnym szumem), jest tam ukryta również poszukiwana informacja o przesunięciach fazowych. Na poparcie tego spostrzeżenia warto zauważyć, że przyjęta do aproksymacji funkcja

wielomianowa nie narzuca swoją istotą oczekiwanej zależności hiperbolicznej. Jeśli mimo to charakteryzuje się kształtem podobnym do hiperbolicznego, możliwe, że faktycznie odwzorowuje informację o przesunięciach fazowych. Podobne spostrzeżenia można wyciągnąć na podstawie pozostałych wykresów $T(V_a)$.

W celu sprawdzenia powyższej hipotezy, zestawiono aproksymacje wszystkich (ośmiu) obliczonych zależności $T(V_a)$ na jednym wykresie. Tym razem użyto już do aproksymacji funkcji hiperbolicznej, aby możliwe było porównanie wyników z teoretyczną zależnością, wyznaczoną na podstawie modelowania przepływu spalin w przewodach służących do ich poboru. Takie zestawienie zostało pokazane na rys. 4.2.



Rys. 4.2. Zestawienie zależności $T(V_a)$ dla ośmiu przypadków obliczonych metodą krótkich funkcji korelacji (linie ciągłe) oraz dla przypadku obliczonego na podstawie modelowania przepływu spalin (linia kreskowa)

Źródło: opracowanie własne

Powyższy wykres ukazuje względnie dużą zbieżność pomiędzy wszystkimi wynikami. Może to stanowić pewne potwierdzenie zasadności proponowanych teoretycznych sposobów wyznaczenia zależności $T(V_a)$. Nie oznacza to oczywiście, że otrzymane wyniki można uznać za doskonale zweryfikowane, ponieważ obydwie metody teoretyczne są bardzo uproszczone, a zgodność pomiędzy nimi nie jest idealna.

5. Podsumowanie

Istniejące w wynikach badań przesunięcia fazowe są ważnym problemem stojącym na przeszkodzie w analizie właściwości użytkowych silników spalinowych w stanach dynamicznych. Istnieje więc potrzeba znalezienia pewnej metody pozwalającej na korekcję owych przesunięć. Kluczowym zadaniem, koniecznym do przeprowadzenia korekcji, jest wyznaczenie 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.

Warto 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. Istniejąca ogólna zgodność pomiędzy wynikami obydwu metod oraz powtarzalność wyników w dziedzinie kilku realizacji analizowanego testu jezdny, jest pewną przesłanką do uznania ich poprawności. Z kolei widoczne rozbieżności pomiędzy poszczególnymi metodami dają pewien obraz niepewności obliczeniowej, z jaką należy się liczyć w prezentowanym rozwiązaniu.

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., Piaseczny L.: Emisja zanieczyszczeń z silnika okrętowego znajdującego się w stanach dynamicznych. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów* 2013, 92 (1).
- [4]. Chłopek Z., Piaseczny L.: Modelling of the effect of work conditions of marine diesel engines on their ecological properties. Monograph: Maritime Transport. Technological Innovations & Research. Universitat Politecnica de Catalunya. BARCELONATECH. Barcelona 2012. 489–501.
- [5]. Chłopek Z., Rostkowski J.: Analiza emisji zanieczyszczeń z silników o zapłonie samoczynnym w warunkach dynamicznych. *Archiwum Motoryzacji* 3/2003. 119–140.
- [6]. Chłopek Z., Rostkowski J.: Analysis of emissions from urban transit buses in real life conditions. *Journal of KONES* 2003. 41–50.
- [7]. Chłopek Z., Szczepański T.: Badanie właściwości użytkowych silników spalinowych w stanach dynamicznych. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów* 2013, 92 (1).
- [8]. Chłopek Z.: Analiza emisji zanieczyszczeń z trakcyjnego silnika spalinowego. *Mechanics and Mechanical Engineering* 1/2005. Volume 9. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej. Łódź 2005. 43–68.
- [9]. 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.
- [10]. Chłopek Z.: Badania warunków pracy silnika spalinowego w czasie rzeczywistego użytkowania w autobusie miejskim. *Archiwum Motoryzacji* 2/2007. 185–200.
- [11]. Chłopek Z.: Metody badań właściwości silników spalinowych w warunkach przypadkowych modelujących użytkowanie. *Archiwum Motoryzacji* 4/2001. 187–210.
- [12]. Chłopek Z.: Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych. *Prace Naukowe. Seria „Mechanika”* z. 173. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1999.
- [13]. Chłopek Z.: Propozycja charakterystyk emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych pracujących w warunkach dynamicznych. *Archiwum Motoryzacji* 2/2009. 111–134.
- [14]. Chłopek Z.: Some remarks on engine testing in dynamic states. *Silniki Spalinowe – Combustion Engines* 4/2010(143). 60–72.
- [15]. Chłopek Z.: The research of the probabilistic characteristics of exhaust emissions from vehicle engines. *Silniki Spalinowe – Combustion Engines* 1/2011(144). 49–56.
- [16]. Kniaziewicz T., Piaseczny L., Zadrąg R.: Toksyczność spalin okrętowego silnika spalinowego podczas jego rozruchu. *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej* 1999 nr 2. 51–63.

- [17]. 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.
- [18]. Marecka-Chłopek E., Chłopek Z.: Synteza testów do badań silników spalinowych maszyn roboczych. Rozdział w monografii „Uwarunkowania ekorozwoju rekreacji i turystyki”. Wydawnictwo Naukowe Gabriel Borowski. Lublin 2008. 258–267.
- [19]. 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.
- [20]. Worldwiede emission standards. Heavy duty & off-road vehicles. Delphi. Innovation for the real world. 2013/2014.
- [21]. Worldwiede emission standards. Passenger cars and light duty vehicles. Delphi. Innovation for the real world. 2013/2014.