



**POLITECHNIKA WARSZAWSKA**  
**Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych**

**PRACA DYPLOMOWA**  
**Magisterska**

Studia stacjonarne – dzienne

**Metoda wyznaczania charakterystyki prędkościowej momentu  
obrotowego i mocy silnika spalinowego za pomocą analizy sygnału  
dźwiękowego**

Opiekun naukowy:

**Prof. dr hab. inż. Zdzisław Chłopek**

Wykonał:

**Tomasz Szczepański**

Prowadzący:

**Prof. dr hab. inż. Zdzisław Chłopek**

Numer albumu:

**185276**

Warszawa, 2008

.....  
/imię i nazwisko/

## **OŚWIADCZENIE**

Jako autor pracy dyplomowej pt.: Metoda wyznaczania charakterystyki prędkościowej momentu obrotowego i mocy silnika spalinowego za pomocą analizy sygnału dźwiękowego zezwalam na publiczne udostępnienie pracy i wyrażam zgodę na jej udostępnienie w Bibliotece Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej w ramach realizacji zadań statutowych biblioteki.

..... /podpis/

Warszawa, dnia .....

## Spis treści

1. Wstęp .....	5
1.1. Motywacja .....	5
1.2. Cel pracy .....	5
1.3. Sprecyzowanie pojęć .....	5
2. Charakterystyka prędkościowa silnika spalinowego .....	7
2.1. Definicja charakterystyki prędkościowej .....	7
2.2. Zastosowania charakterystyki prędkościowej .....	7
2.3. Standardowe metody wyznaczania charakterystyki prędkościowej .....	8
2.4. Trudności związane ze standardowymi metodami .....	8
2.5. Poszukiwania nowych metod do wyznaczania charakterystyki prędkościowej .....	9
3. Metoda dźwiękowa .....	10
3.1. Idea metody .....	10
3.2. Konieczne założenia .....	10
3.3. Koncepcja wyznaczania charakterystyki prędkościowej .....	11
3.4. Specyfika pracy silnika podczas badań .....	12
3.5. Przebieg badań .....	13
3.5.1. Stosowane narzędzia pomiarowe i przedmiot badań .....	13
3.5.2. Przebieg czynności badawczych .....	13
3.5.3. Badanie zależności między ciśnieniem akustycznym dźwięku, a prędkością obrotową .....	14
3.6. Implementacja algorytmu obliczeń .....	15
3.7. Algorytm obliczeń .....	15
3.7.1. Dane wejściowe do obliczeń .....	16
3.7.1.1. Dane silnika i samochodu .....	16
3.7.1.2. Sygnał dźwiękowy .....	16
3.7.2. Przygotowanie sygnału .....	17
3.7.2.1. Standaryzacja sygnału .....	17
3.7.2.2. Filtr o zmiennej częstotliwości przepustowości .....	18
3.7.2.3. Filtr adaptacyjny .....	19
3.7.3. Tworzenie widma czasowo-częstotliwościowego .....	21
3.7.3.1. Podział sygnału .....	21
3.7.3.2. Krótco-czasowa transformata Fouriera .....	22
3.7.3.3. Krótco-czasowa metoda podprzestrzeni – MUSIC .....	23
3.7.4. Obliczanie prędkości obrotowej .....	25
3.7.4.1. Znajdowanie maksimum na widmie czasowo-częstotliwościowym .....	25
3.7.4.2. Zamiana ciśnienia akustycznego dźwięku na prędkość obrotową .....	26
3.7.4.3. Oczyszczenie przebiegu z zakłóceń .....	26
3.7.5. Obliczanie momentu obrotowego .....	28
3.7.5.1. Różniczkowanie przebiegu prędkości kątowej .....	28
3.7.5.2. Sposób obliczania momentu obrotowego .....	28
3.7.5.3. Wygładzenie przebiegu .....	28
3.7.6. Operacje końcowe .....	29
3.7.6.1. Złożenie charakterystyki prędkościowej momentu obrotowego .....	29
3.7.6.2. Obliczenie charakterystyki prędkościowej mocy .....	30

4. Weryfikacja metody wyznaczania charakterystyki prędkościowej .....	31
4.1. Sposób weryfikacji metody .....	31
4.2. Przebieg badań hamownianych .....	31
4.2.1. Zastosowane narzędzia i badany obiekt .....	31
4.2.2. Rejestrowane wielkości .....	31
4.2.3. Przebieg czynności badawczych .....	32
4.3. Przetwarzanie wyników badań hamownianych .....	33
4.3.1. Charakterystyka tworzona z wyników pomiaru czujnika indukcyjnego .....	33
4.3.2. Charakterystyka tworzona z wyników pomiaru prędkości rolek hamowni .....	35
4.3.3. Charakterystyka tworzona z wyników pomiaru za pomocą hamulca hamowni .....	36
4.4. Trudności z wykorzystaniem badań hamownianych do weryfikacji metody .....	38
4.5. Wyznaczenie charakterystyki prędkościowej metodą dźwiękową .....	43
4.6. Porównanie wyników metody dźwiękowej z wynikami badań hamownianych .....	43
5. Wykorzystanie metody a specyfika pracy silnika przy różnych obciążeniach zewnętrznych .....	47
5.1. Stopień dynamiczności pracy silnika przy różnych obciążeniach zewnętrznych .....	47
5.2. Wpływ stopnia dynamiczności na charakterystykę prędkościową .....	47
5.3. Niebezpieczeństwo błędnego wykorzystania metody .....	48
5.4. Inne zastosowania metody .....	49
6. Możliwości dalszego rozwoju metody wyznaczania charakterystyki prędkościowej .....	50
6.1. Rozwój koncepcyjny .....	50
6.2. Rozwój algorytmu matematycznego .....	50
6.3. Rozwój sprzętowy .....	50
7. Podsumowanie .....	51
7.1. Możliwe zastosowania metody wyznaczania charakterystyki prędkościowej .....	51
7.2. Ocena przydatności metody wyznaczania charakterystyki prędkościowej .....	51
7.2.1. Zalety metody .....	51
7.2.2. Wady metody .....	51
7.3. Uwagi i wnioski końcowe .....	52
7.4. Odniesienie do celu pracy .....	52
8. Bibliografia .....	53
Dodatek .....	54

# 1. Wstęp

## 1.1. Motywacja

W dobie tak szybkiego postępu technicznego – również w dziedzinie silników spalinowych – diagnozowanie jest częściej występującym i bardziej skomplikowanym problemem, niż mogłoby się wydawać. Istnieje potrzeba takiego rozwoju narzędzi i metod diagnostycznych, aby określały one stan silników coraz dokładniej, szybciej, prościej lub coraz mniejszym kosztem.

Jednym z podstawowych wskaźników diagnostycznych jest charakterystyka prędkościowa pracy silnika. Znajduje ona swoje zastosowanie zarówno przy ocenie stanu technicznego silnika (aby sprawdzić, czy istnieje potrzeba serwisowania), przydatności silnika do określonych zadań (na przykład prowadzenie obliczeń trakcyjnych samochodu) oraz jako pomoc w ocenie efektów zmian konstrukcyjnych silników, prowadzonych zarówno przez instytucje naukowe, organizacje sportowe, jak również przez amatorów - majsterkowiczów - modyfikujących silniki w przydomowych garażach.

W wielu wypadkach standardowe metody wyznaczania charakterystyki prędkościowej silnika okazują się zbyt skomplikowane, czasochłonne lub zbyt drogie. Niniejsza praca stanowi próbę odpowiedzi na brak prostych metod diagnostycznych silników spalinowych - dostępnych dla każdego, nie wymagających prowadzenia skomplikowanych i drogich badań laboratoryjnych.

## 1.1. Cel pracy

Celem niniejszej pracy jest stworzenie nowej metody, służącej do wyznaczania charakterystyki prędkościowej momentu obrotowego i mocy silnika spalinowego. Ma ona polegać na analizie sygnału dźwiękowego powstającego w pobliżu silnika (na przykład w komorze silnikowej – jak to jest w wypadku samochodu osobowego) w trakcie jego pracy. Musi ona spełniać następujące warunki:

- dokładność wyznaczanych wartości wielkości ma być porównywalna z dokładnością osiąganą na stanowisku hamowni podwoziowej,
- badanie ma być proste do zrealizowania, nie wymagające specjalnych, ciężkich stanowisk laboratoryjnych,
- koszt wykonania badania ma być pomijalnie mały w porównaniu z kosztem konserwacji silnika,
- metoda ma nadawać się do dalszego rozwoju jako narzędzia diagnostycznego.

## 1.3. Sprecyzowanie pojęć

W celu wyeliminowania ewentualnych niejasności związanych z uproszczonym nazewnictwem, już we wstępie zostaną doprecyzowane pewne pojęcia.

Prezentowana metoda polega na analizie sygnału dźwiękowego powodowanego przez nieciągłe spalanie mieszanki palnej w komorach spalania silników. Dlatego pod pojęciem silnika (lub silnika spalinowego) należy rozumieć tłokowy silnik spalinowy,

wyposażony w mechanizm korbowy. Temat pracy nie obejmuje na przykład silników turbinowych, w których występuje ciągły proces spalania. Rozważając teoretycznie, metoda mogłaby znajdować zastosowanie w wypadku niektórych rzadziej spotykanych silników spalinowych, jak choćby silnik z tłokiem wirującym (tak zwany silnik Wankla), ponieważ występuje w nim okresowe spalanie mieszanki palnej. Jednak wówczas metoda wymagałaby niewielkich modyfikacji, które nie zostaną przedstawione w niniejszej pracy.

Ponadto praca dotyczy wyznaczania zależności między mocą i momentem obrotowym silnika, a jego prędkością obrotową. Nie zostaną w niej podjęte próby wyznaczania takich parametrów, jak natężenie zużycia paliwa, emisja zanieczyszczeń i zadymienia lub temperatura spalin. Nie będzie również wyznaczany stopień obciążenia silnika, a w przedstawionych przykładowych badaniach silnik zawsze będzie pracował przy maksymalnym ustawieniu urządzenia sterującego jego obciążeniem.

Poza tym przy wyznaczaniu charakterystyki prędkościowej silnika w sposób zgodny z Polską Normą [9] muszą zostać spełnione określone wymogi – na przykład silnik ma pracować ze stałą prędkością obrotową przez co najmniej jedną minutę przy każdym pomiarze. Podczas przeprowadzanych badań wymogi te (celowo) nie zostały spełnione. Szczególną uwagę należy zwrócić na fakt, że silnik pracował ze zmienną prędkością obrotową wału korbowego. W związku z tym powstałych charakterystyk nie można jednoznacznie nazywać charakterystyką prędkościową silnika w ujęciu Polskiej Normy. Jest to jedynie pewna zależność między momentem obrotowym (lub mocą) i prędkością obrotową silnika. Jednak w niniejszej pracy zależność ta będzie nazywana charakterystyką prędkościową, ponieważ uzależnia wszystkie wyznaczane wielkości od prędkości obrotowej wału korbowego silnika.

## 2. Charakterystyka prędkościowa silnika spalinowego

### 2.1. Definicja charakterystyki prędkościowej [8]

Silnik spalinowy, jak wiadomo, służy do zamiany energii chemicznej zawartej w paliwie na energię mechaniczną. Ta druga forma energii emitowana jest za pomocą wału korbowego, którego jeden koniec, zaopatrzony w koło zamachowe, wyprowadzony jest na zewnątrz silnika. Silnik ów może wykonywać pracę (czyli przekazywać energię) w taki sposób, że przy określonej prędkości obrotowej wału korbowego wytwarzany jest pewien moment obrotowy, który może być wykorzystany na przykład do napędu pojazdu. Wartości momentu obrotowego są różne dla różnych wartości prędkości obrotowej. Ponadto występują one tylko w pewnym zakresie prędkości obrotowej, zawierającym się między minimalną i maksymalną eksploatacyjną prędkością obrotową silnika. W tym przedziale można opisać pewną zależność momentu obrotowego od prędkości obrotowej. Taka zależność jest opisywana charakterystyką prędkościową momentu obrotowego silnika.

Można wyróżnić dwa znaczenia pojęcia charakterystyki prędkościowej silnika: ogólne i zdefiniowane przez Polską Normę [9]. W ujęciu ogólnym jest to zależność dowolnych wielkości fizycznych (na przykład momentu obrotowego) uzależnionych od prędkości obrotowej wału korbowego silnika. W ujęciu Polskiej Normy jest to taka zależność dowolnych wielkości fizycznych opisujących stan pracy silnika (zdefiniowanych w Polskich Normach) uzależnionych od prędkości obrotowej wału korbowego silnika, która wyznaczana jest przy określonych (przez Polskie Normy) warunkach otoczenia (ciśnienie i temperatura powietrza, rodzaj i temperatura paliwa itd.), po odpowiednim przygotowaniu silnika oraz przy określonych warunkach pracy (jak na przykład niezmiennosc prędkości obrotowej). W prezentowanej pracy pojęcie charakterystyki prędkościowej silnika będzie odnosiło się do pierwszego (ogólnego) znaczenia.

Takie charakterystyki można wyznaczać dla różnych stopni obciążenia silnika - powstaną wówczas charakterystyki częściowe, mające różny przebieg. Jeżeli jednak badania przeprowadzi się przy pełnym obciążeniu i przy nastawach fabrycznych, wówczas powstanie tak zwana zewnętrzna charakterystyka eksploatacyjna. Takie właśnie charakterystyki dotyczą omawianej pracy.

### 2.2. Zastosowania charakterystyki prędkościowej

Charakterystyka prędkościowa znajduje wiele zastosowań. Do podstawowych należą obliczenia trakcyjne samochodu [1]. Wyznaczają one, jak samochód – jako całość – będzie się zachowywał na drodze. Dzięki temu można stwierdzić, czy dany silnik będzie spełniał wymagania stawiane napędowi określonego samochodu w zadanych warunkach. Nie są to informacje potrzebne tylko producentom samochodów, ale wszystkim, którzy są zainteresowani wprowadzaniem pewnych zmian w konstrukcji, czy sterowaniu silnikiem, w celu poprawienia jego właściwości. Należą do nich organizacje sportowe, warsztaty mechaniczne oraz samodzielni „majsterkowicze”.

Charakterystyka prędkościowa może istnieć również samodzielnie (bez obliczeń trakcyjnych) – jako wskaźnik porównawczy silników lub podstawa do wyznaczenia pewnych wskaźników. Interesujące są zwykle takie wielkości, jak maksymalny moment obrotowy, maksymalna moc oraz wartości prędkości obrotowych, przy których występują te wielkości. Na ich podstawie wyznacza się często wartości elastyczności prędkości obrotowej,

elastyczności momentu obrotowego i ogólnej elastyczności pracy silnika. Wskazują one na łatwość dostosowania momentu obrotowego silnika do zmiennych warunków pracy.

Jednym z najważniejszych zastosowań charakterystyki prędkościowej jest diagnostyka stanu technicznego silnika [10]. Ponieważ kształt takiej charakterystyki jest wynikiem bardzo wielu zjawisk fizycznych zachodzących wewnątrz silnika w czasie jego pracy, jakiegokolwiek zaburzenie tych zjawisk (spowodowane dowolną usterką) będzie skutkowało zmianą kształtu charakterystyki. Istnieją prace naukowe, pokazujące, jakie uszkodzenia konstrukcyjne powodują określone zmiany w charakterystyce prędkościowej. W tej chwili nie jest celowe przedstawianie tych zależności, ale trzeba zauważyć fakt, że charakterystyka prędkościowa jest bardzo ważnym, a jednocześnie chyba „niedocenianym” wskaźnikiem diagnostycznym.

Istnieje jeszcze wiele innych zastosowań dla charakterystyki prędkościowej, ale ważne jest jedynie spostrzeżenie, że jest ona w wielu wypadkach bardzo przydatnym narzędziem.

### **2.3. Standardowe metody wyznaczania charakterystyki prędkościowej [9]**

Oczywiście sposób wyznaczania charakterystyki prędkościowej jest dobrze znany i powszechnie wykorzystywany przez wiele firm, instytucji naukowych i nie tylko. Używa się w tym celu stanowisk hamownianych. Istnieją dwa rodzaje hamowni.

1. Hamownia silnikowa jest podstawowym narzędziem do wyznaczania charakterystyki prędkościowej. Zakłada ona umieszczenie samego silnika na stanowisku laboratoryjnym, wyposażonym w hamulec oraz urządzenia sterujące pracą silnika i dokonujące pomiaru parametrów jego pracy. Hamulec wytwarza określony moment obrotowy, stanowiący opór dla wału korbowego silnika. W ten sposób można dowolnie mierzyć zależności między prędkością obrotową, momentem obrotowym, obciążeniem, zużyciem paliwa oraz dodatkowymi wielkościami, jak temperatury, stężenie substancji szkodliwych oraz zadymienie spalin (w wypadku silników o zapłonie samoczynnym) i tym podobne. Sposób wyznaczania charakterystyki prędkościowej na takim stanowisku ujęty jest w Polskich Normach [9].

2. Hamownia podwoziowa jest bardziej skomplikowanym urządzeniem, ponieważ nie wymaga wymontowania silnika z pojazdu, ale dostarcza hamujący moment obrotowy na koła napędowe samochodu – za pomocą rolek (na których znajdują się koła napędowe). Z owych rolek moment obrotowy przenoszony jest do hamulca. Proces pomiaru parametrów pracy silnika odbywa się tak samo, jak w poprzednim wypadku, ale na wyznaczaną charakterystykę nakładają się zjawiska związane z pracą układu przeniesienia napędu oraz ze współpracą kół napędowych z rolkami. Czasami zamiast hamulca stosuje się element bezwładnościowy i wówczas mówi się o hamowni inercyjnej.

### **2.4. Trudności związane ze standardowymi metodami**

Niestety z tymi metodami wiążą się pewne trudności przy ich realizacji.

1. W wypadku hamowni silnikowej podstawowym problemem jest czasochłonność badania. W szczególności należy zwrócić uwagę na czas trwania czynności przygotowawczych oraz końcowych. Przed badaniem należy bowiem wymontować silnik z pojazdu, a na koniec zamontować go z powrotem.



2. W wypadku hamowni podwoziowej czas trwania samego badania jest dość krótki, ale zdecydowanie gorzej przedstawia się sprawa z dokładnością dokonywanych pomiarów. Więcej na ten temat zostanie powiedziane w tej pracy w rozdziale 4.4., poświęconemu trudnościom związanym z interpretacją wyników badań hamownianych. Trudności te wynikają przede wszystkim ze specyfiki współpracy kół napędowych z rolkami hamowni.

3. W obydwu wypadkach (zarówno hamowni silnikowej, jak i podwoziowej) wymagane jest zastosowanie skomplikowanych i ciężkich przyrządów, do których trzeba dojechać samochodem. Nie możliwe jest przeprowadzenie takich badań w przydomowym garażu.

4. Ostatnim, bardzo ważnym problemem jest koszt wyznaczenia charakterystyki prędkościowej. Stosując hamownię silnikową należy liczyć się z kosztami wymontowania silnika. Z kolei przeciętna hamownia podwoziowa kosztuje ponad 200 000 PLN. W związku z tym cena wyznaczenia charakterystyki prędkościowej rzadko wynosi mniej niż 200 PLN (i to w wypadku jedynie hamowni stosowanych do użytku powszechnego - nie naukowego).

Podsumowując powyższe problemy, należy zauważyć, że wykluczona jest możliwość częstej kontroli charakterystyki prędkościowej w celu podjęcia decyzji, czy należy zgłosić się do serwisu. Jest to również trudne dla przeciętnego majsterkowicza – amatora, który chce wprowadzić samodzielnie w swoim silniku kilka zmian, aby podnieść parametry eksploatacyjne samochodu.

Dlatego celowe jest poszukiwanie nowych, tańszych i łatwiejszych do zastosowania metod wyznaczania parametrów pracy silników. Mogą one przynieść korzyści zarówno zwykłym kierowcom i majsterkowiczom, jak i dużym firmom, montującym takie urządzenia w swoich samochodach i wykorzystującym je jako jedno z podstawowych narzędzi diagnostycznych silników.

## **2.5. Poszukiwania nowych metod do wyznaczania charakterystyki prędkościowej**

Na rynku pojawiło się wiele tanich urządzeń, umożliwiających samodzielne wyznaczanie charakterystyki prędkościowej. Działają one zwykle na zasadzie pomiaru przyspieszeń samochodu. Jednak również one mają wiele wad. Niska cena wymusza tutaj niezbyt dobre parametry pomiaru – przede wszystkim niewielką rozdzielczość mierzonych wartości, ale także małą częstotliwość próbkowania. Uniemożliwia to wykonywanie badań silnika w szybkozmiennych warunkach pracy (nieco więcej na ten temat zostanie powiedziane w dalszych rozdziałach pracy). Ogólnie – ze względu na ocenę parametrów samochodu jako całości oraz niewielką dokładność pomiaru trudno jest stosować je w celach diagnostycznych silnika lub w celach naukowo - badawczych.

### 3. Metoda dźwiękowa

W związku z przedstawionymi wcześniej rozważaniami powstała koncepcja stworzenia zupełnie nowej metody, pozwalającej na szybkie, proste, dokładne i przede wszystkim tanie wyznaczenie charakterystyki prędkościowej silnika.

#### 3.1. Idea metody

Każda metoda wyznaczania charakterystyki prędkościowej wykorzystuje pewne informacje o stanie pracy silnika, emitowane na zewnątrz w trakcie jego pracy. Należą do nich między innymi: zmienne pole elektro-magnetyczne (na przykład w pobliżu przewodów wysokiego napięcia – w wypadku silników o zapłonie iskrowym), obraz wirujących elementów silnika oraz sama moc mechaniczna, emitowana za pomocą jednego końca wału korbowego. Standardowe metody wyznaczania charakterystyki prędkościowej wykorzystują tę ostatnią informację wraz z pomiarem prędkości obrotowej wału korbowego.

Nośnikiem informacji wykorzystywanych w omawianej metodzie jest sygnał dźwiękowy. Dlatego polega ona na pomiarze i rejestracji ciśnienia akustycznego w pobliżu pracującego silnika, a następnie na analizie sygnału dźwiękowego w taki sposób, aby wyznaczyć pewne parametry jego pracy, takie jak: prędkość obrotowa i moment obrotowy. Jeżeli silnik w trakcie dokonywania pomiaru będzie zmieniał prędkość obrotową wału korbowego i moment obrotowy generowany na tym wale, wówczas będzie możliwe wyznaczenie zależności między momentem obrotowym, a prędkością obrotową, czyli stworzenie charakterystyki prędkościowej momentu obrotowego, a następnie i mocy.

#### 3.2. Konieczne założenia

Aby wykorzystać sygnał dźwiękowy jako źródło informacji o parametrach pracy silnika, należy odpowiedzieć na dwa, bardzo ważne pytania.

1) Po pierwsze, czy taka informacja rzeczywiście w danym sygnale się znajduje?

Oczywistym wydaje się, że jakakolwiek próba wyznaczenia dowolnej wielkości ze źródła, które nie zawiera o niej informacji, jest nieracjonalna. Jednak odpowiedź na pierwsze pytanie jest stosunkowo prosta.

Wystarczy stwierdzić, że sygnał dźwiękowy emitowany w powiązaniu z różnymi wartościami badanego parametru różni się od siebie i ta różnica nie jest przypadkowa. Oczywiście każda realizacja sygnału będzie w praktyce różnić się od pozostałych w sposób przypadkowy z powodu szumu, jako części składowej sygnału. Ważne jest jednak, aby oprócz tej różnicy istniała jeszcze inna – przyczynowa.

Można – rzecz jasna – proponować tutaj wiele sposobów wykrywania takiej różnicy. Ale wbrew wszelkim osiągnięciom nauki trzeba przyznać z pokorą, że we wstępnej, szacunkowej ocenie najbardziej przydatny jest ludzki słuch. Jeżeli słyhać na przykład, że silnik bardziej obciążony przy tej samej prędkości obrotowej wydaje z siebie inny odgłos, niż silnik mniej obciążony, to można mieć pewność, że w takim odgłosie informacja o obciążeniu silnika na pewno się znajduje.

Niestety słuch ludzki ma też swoje wady. Chociaż potrafi doskonale zauważać pewne typowe odgłosy, nie jest w stanie ich sensownie mierzyć, analizować, czy nawet dokładnie

rejestrować. W tym momencie niezbędne stają się zdobycze współczesnej techniki, które muszą tak przetwarzać zadany sygnał, aby wydobyć z niego pożądaną informację. Pojawia się więc drugie – trudniejsze pytanie.

2) Czy istniejącą w sygnale informację można z niego wydobyć?

Niestety, okazuje się, że ta odpowiedź nie jest oczywista. Może się bowiem okazać, że informacja wchodząca do sygnału sumuje się z takimi zakłóceniami, że w niektórych miejscach prawie zanika. Jakikolwiek próby wyłonienia jej spowodują wygenerowanie błędów o wartościach niemożliwych do zaakceptowania. W związku z tym powyższe pytanie można by zmodyfikować w następujący sposób: Czy istniejącą w sygnale informację można wydobyć z zadowalającą dokładnością? Okazuje się, że w niektórych wypadkach jest to możliwe.

### 3.3. Koncepcja wyznaczania charakterystyki prędkościowej

Pierwszym krokiem jest pomiar i rejestracja ciśnienia akustycznego w wybranym punkcie komory silnikowej w trakcie pracy silnika ze zmienną prędkością obrotową - najlepiej: od minimalnej prędkości osiągananej dla danego silnika do maksymalnej.

Powstały zapis cyfrowy sygnału dźwiękowego traktowany jest jako nośnik informacji o prędkości obrotowej pracy silnika, zmieniającej się w czasie. Wartość prędkości obrotowej jest bowiem proporcjonalna do częstotliwości głównej sygnału. Dlatego w im większym przedziale prędkości obrotowej będzie pracował silnik w trakcie badania, w tym szerszej dziedzinie zostanie wyznaczona charakterystyka prędkościowa.

Do wyznaczenia momentu obrotowego wykorzystuje się drugie prawo dynamiki Newtona, według którego ciało, na które działa stała, niezrównoważona siła ( $F$ ), porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym o przyspieszeniu ( $a$ ) równym ilorazowi wartości działającej siły i masy danego ciała ( $m$ ) - 3.1.

$$a = \frac{F}{m} \quad 3.1.$$

Można go zmodyfikować tak, aby zawierał powyższe zależności dla ruchu obrotowego wału korbowego silnika. Wówczas będzie on przedstawiał następującą zależność:

$$\varepsilon \cdot I = \sum M \quad 3.2.$$

We wzorze 3.2.  $\varepsilon$  – oznacza przyspieszenie kątowe wału korbowego,  $\sum M$  – sumę momentów obrotowych na wale korbowym, a  $I$  - sumę momentów bezwładności ruchomych części silnika sprowadzonych do osi obrotu wału korbowego (i ewentualnie innych elementów bezwładnościowych, jeśli mają one wpływ na bezwładność wału korbowego silnika).

Suma momentów ( $\sum M$ ) jest sumą momentu obrotowego generowanego przez silnik ( $M_s$ ) i momentu oporów ( $M_o$ ), przy czym moment oporów ma przeciwny zwrot do momentu obrotowego silnika. W związku z tym wzór 3.2. można zapisać w następujący sposób:

$$\varepsilon \cdot I + M_o = M_s \quad 3.3.$$

Moment oporów może być bardzo różny w zależności od warunków, w jakich silnik poddawany jest badaniu. Jeśli samochód znajduje się w tym czasie w ruchu, mogą to być opory ruchu. W najprostszym wypadku – samochód może znajdować się na postoju i silnik może być odłączony od układu przeniesienia napędu za pomocą sprzęgła. Wówczas moment oporów ( $M_o$ ) będzie równy zero. Przyjęte jest tutaj założenie, że moment oporów własnych silnika uwzględniony jest w momencie obrotowym emitowanym za pomocą wału korbowego.

Moment bezwładności ( $I$ ) można wyznaczyć empirycznie lub otrzymać jako wartość daną od producenta.

Mając takie informacje, można wyznaczyć wartości momentu obrotowego silnika ( $M_s$ ), o ile uda się uzyskać wartości przyspieszenia kątownego ( $\epsilon$ ). Te natomiast można obliczyć różniczkując przebieg prędkości obrotowej (otrzymany z analizy sygnału dźwiękowego).

Mając przebiegi czasowe prędkości obrotowej i momentu obrotowego, można potraktować je jako funkcję parametryczną, a następnie złożyć w jedną funkcję wyrażającą zależność momentu obrotowego od prędkości obrotowej. W ten sposób powstanie charakterystyka prędkościowa momentu obrotowego. Na koniec można wyznaczyć także moc silnika.

Pomysł uzyskiwania takiej charakterystyki za pomocą różniczkowania prędkości obrotowych silnika nie jest nowy [10]. Nowością jest jednak wykorzystanie w tym celu sygnału dźwiękowego silnika.

### **3.4. Specyfika pracy silnika podczas badań**

W trakcie badań należy zwrócić szczególną uwagę na warunki, w jakich pracuje silnik w trakcie wykonywania pomiarów. Istotnymi czynnikami są nie tylko: stopień obciążenia silnika, czy przyjmowane wartości prędkości obrotowych. Ważna jest również szybkozmienność warunków pracy silnika – która w dalszej części pracy będzie nazywana stopniem dynamiczności jego pracy, a jej miarą może być przyspieszenie kątowne wału korbowego silnika  $\epsilon$ .

Zależność momentu obrotowego od stopnia dynamiczności oznacza, że moment obrotowy będzie się zmieniał w zależności od tego, czy przyspieszamy samochodem, czy jedziemy ze stałą prędkością. Nie jest to związane wyłącznie z obciążeniem silnika, który może być maksymalnie obciążony, ale w pierwszym przypadku jechać ze stałą prędkością pod górę, przez co moment oporów zrównoważy się z momentem napędowym. W drugim przypadku samochód może stać na postoju, a kierowca może nacisnąć maksymalnie pedał przyspieszenia, powodując tym samym maksymalne obciążenie silnika. Wówczas moment obrotowy osiągany przez silnik przy poszczególnych wartościach prędkości obrotowej będzie się różnił od momentu generowanego w warunkach statycznych (na przykład podczas jazdy pod górę ze stałą prędkością). W obliczeniach trakcyjnych przyjmuje się zwykle, że przy jeździe ze zmienną prędkością moc silnika spada o 2% w stosunku do mocy przy stałej prędkości. Jest to jednak bardzo duże przybliżenie, ponieważ przyspieszenie kątowne  $\epsilon$  silnika, a więc i „stopień dynamiczności” jego pracy może zmieniać się płynnie od kilku tysięcy obrotów na minutę w ciągu jednej sekundy do 0 – przy pracy w warunkach statycznych.

Stopniem dynamiczności pracy silnika można sterować wobec tego za pomocą zadawania odpowiedniego momentu oporów zewnętrznych. Podczas pracy silnika na postoju będzie on największy, a podczas jazdy na ostatnim biegu pod górę - znacznie mniejszy – dążący do statycznego stanu pracy.

Nie powinien więc dziwić fakt, że charakterystyka prędkościowa otrzymana na postoju za pomocą analizy sygnału dźwiękowego może się nieco różnić od charakterystyki wykonanej w trakcie jazdy na piątym biegu pod górę lub na stanowisku hamownianym - przy stałej prędkości obrotowej (zgodnie z postanowieniami zawartymi w Polskiej Normie). Nie oznacza to wcale, że któraś z tych charakterystyk prędkościowych jest niepoprawna, ale każda z nich opisuje zachowanie silnika w innych warunkach pracy. Przy prowadzeniu badań należy więc pamiętać o takim dobraniu warunków pracy silnika, aby otrzymane wyniki odpowiadały zadaniom, do jakich będziemy wykorzystywali charakterystykę prędkościową.

Temat ten zostanie rozszerzony w rozdziale 5. - Wykorzystanie metody, a specyfika pracy silnika przy różnych obciążeniach zewnętrznych.

### **3.5. Przebieg badań**

#### **3.5.1. Stosowane narzędzia pomiarowe i przedmiot badań**

Do przeprowadzenia badań wykorzystano możliwie jak najtańsze urządzenie pomiarowe. Był to dyktafon cyfrowy o częstotliwości próbkowania 22 kHz, a wartość próbki „audio” wynosiła 4 b, co dawało szybkość transferu 88 kb/s. Przebieg sygnału był rejestrowany w formie cyfrowej w pamięci typu Flash, nadającej się do przeniesienia na dysk twardy komputera jako plik typu „wave”. Całkowity koszt aparatury nie przekroczył 100 PLN.

Badania wykonano na samochodzie osobowym marki Polonez Caro 1.5 MR'94 GLE, zasilanym paliwem LPG.

#### **3.5.2. Przebieg czynności badawczych**

Badania wykonano na samochodzie w trakcie jego postoju, przy rozłączonym sprzęgle, po rozgrzaniu silnika.

Przy prędkości obrotowej biegu jałowego ustawiono przepustnicę w maksymalnym położeniu i rejestrowano emitowany sygnał dźwiękowy. Silnik zwiększał prędkość obrotową wału korbowego aż do prędkości 5000 obr/min. Proces ten trwał krócej niż 1 s. Należy zaznaczyć, że na początkowy czas badania nałożyły się zjawiska związane z gwałtownym przyciśnięciem pedału przyspieszenia, które mogły zakłócić działanie silnika. Dlatego pierwsze ułamki sekund zostały wyeliminowane z dalszej analizy. Nie oznacza to, że należy zawsze tak postępować, ponieważ zachowanie silnika w czasie zmiany jego parametrów sterowania niekiedy może być również interesujące.

Podczas wykonywania tej próby mierzone było i rejestrowane ciśnienie akustyczne w jednym z punktów komory silnikowej samochodu. Punkt ten nie był wybierany bardzo precyzyjnie. Znajdował się po lewej stronie kadłuba silnika (w pobliżu świec zapłonowych), w odległości około 20 cm od kadłuba.

Tak zapisany sygnał dźwiękowy przeniesiono do komputera w celu przeprowadzenia jego analizy.

### 3.5.3. Badanie zależności między przebiegiem dźwięku, a prędkością obrotową

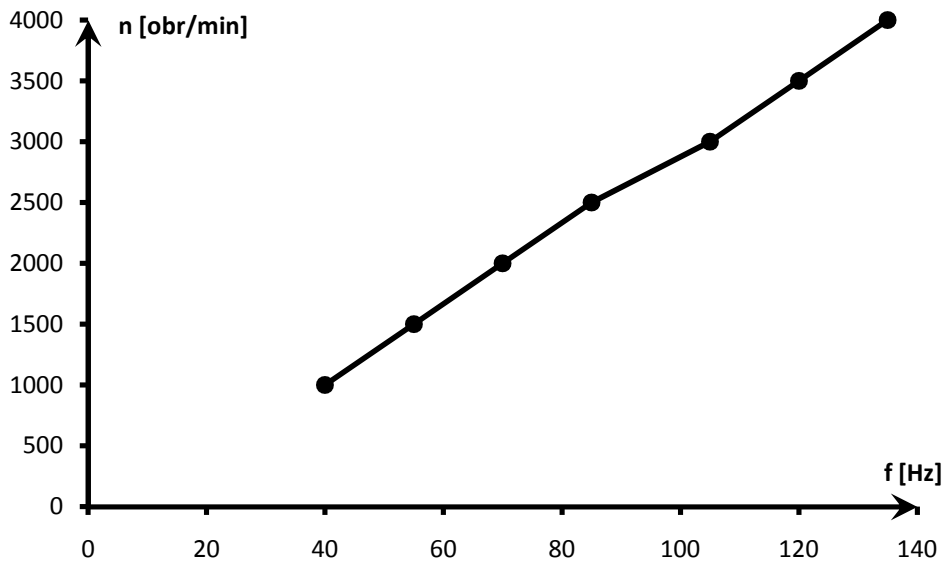
W celu zbadania zależności między przebiegiem dźwięku, a prędkością obrotową silnika, wykonano wiele pomiarów sygnału dźwiękowego podczas pracy silnika ze stałymi, znanymi wartościami prędkości obrotowej – dla prędkości obrotowych wynoszących kolejno: 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000 i 4500 obr/min.

Następnie dla każdego sygnału wyznaczono częstotliwość główną dźwięku. Stworzono zależność funkcyjną między prędkością obrotową, a częstotliwością główną. Okazało się (czego należało oczekiwać), że jest to zależność liniowa, przedstawiająca się w następujący sposób:

$$n = 30 \cdot f \quad 3.4.$$

gdzie:  $f$  – oznacza częstotliwość główną dźwięku wyrażoną w Hz, a  $n$  – prędkość obrotową wału korbowego wyrażoną w obr/min. Wykres tej funkcji został przedstawiony na rysunku 3.1. Niewielkie odchylenia od tej zależności widoczne na wykresie są związane z niedokładnością pomiaru za pomocą obrotomierza zamontowanego w samochodzie.

Ten rezultat funkcyjny jest zgodny z oczekiwaniami teoretycznymi, które zakładają, że podstawowym źródłem dźwięku wydobywającego się z silnika są wybuchy mieszanki paliwowo-powietrznej w komorach spalania. W wypadku silnika cztero-cylindrowego, czterosuwowego (jakim był badany silnik) na jeden obrót wału korbowego przypadają dwa suwy pracy (związane z emisją dużej energii akustycznej).



Rys. 3.1. Zależność między częstotliwością główną sygnału ( $f$ ) a prędkością obrotową wału korbowego silnika ( $n$ ).

Wobec tego prędkość obrotowa ( $N$ ) wyrażona w obrotach na sekundę wynosi:

$$N = \frac{f}{2} \quad 3.5.$$

Po przeliczeniu na prędkość obrotową ( $n$ ) wyrażoną w obrotach na minutę, otrzymuje się zależność ze wzoru 3.4.

Dla silników o innej liczbie cylindrów, należy stwierdzić, ile suwów pracy przypada niejednocześnie na jeden obrót wału korbowego. Wówczas zależność między prędkością obrotową, a częstotliwością główną sygnału będzie można obliczyć z zależności:

$$n = \frac{1}{i} \cdot f \quad 3.6.$$

gdzie  $i$  – oznacza liczbę suwów pracy przypadających niejednocześnie na jeden obrót wału korbowego.

### 3.6. Implementacja algorytmu obliczeń

Po wprowadzeniu zapisu cyfrowego sygnału dźwiękowego do komputera, został on skonwertowany w programie Cool Edit Pro version 2.0 do pliku typu tekstowego, jako wektor kolejnych wartości ciśnienia akustycznego. W tym też programie (umożliwiającym odsłuchanie nagrania) usunięto nieinteresujące fragmenty nagrania – pozostawiając jedynie sygnał zarejestrowany w czasie przyspieszania wału korbowego silnika.

Tak zapisany wektor można było bez przeszkód otworzyć w programie Matlab 5.3 i w nim właśnie dokonać całej analizy sygnału oraz wykonać wszystkie inne obliczenia.

Powstały algorytm nie został w tym rozdziale przedstawiony w formie jednolitego programu – nadającego się do zastosowania przez dowolnego użytkownika samochodu lub do zastosowań komercyjnych. W czasie wykonywania pracy miał on postać pojedynczych skryptów napisanych w języku Matlab (uruchamianych niezależnie - w zależności od potrzeb – w różnych konfiguracjach). Algorytm stanowi jednak całość logiczną, przedstawioną w kolejnym podrozdziale (3.7.). Natomiast w dodatku do pracy został przedstawiony program przedstawiający opisywany algorytm w formie pojedynczego skryptu w języku programowania Matlab – w formie ciągłej.

### 3.7. Algorytm obliczeń

Algorytm obliczeń przewiduje istnienie kilku kolejno następujących po sobie etapów:

- wczytanie wektora sygnału dźwiękowego oraz określenie parametrów silnika (oraz samochodu, jeśli to konieczne) wymaganych do przeprowadzenia obliczeń,
- przygotowanie sygnału dźwiękowego tak, aby można było dokonać analizy czasowo-częstotliwościowej (sprowadza się przede wszystkim do oczyszczenia sygnału z szumów i innych jego elementów niosących nieistotne informacje),
- wyznaczenie widma czasowo-częstotliwościowego sygnału,
- na podstawie powstałego widma wyznaczenie prędkości obrotowych wału korbowego,
- na podstawie wyznaczonych prędkości obrotowych oraz danych parametrów silnika – wyznaczenie jego momentów obrotowych,

- finalizowanie obliczeń - stworzenie charakterystyki prędkościowej.

Wszystkie te etapy korespondują ze sobą za pomocą zmiennych, wektorów i macierzy – przekazywanych z danego etapu do następnego.

Zostaną one wszystkie szczegółowo omówione w następnych podpunktach tego rozdziału.

### **3.7.1. Dane wejściowe do obliczeń**

#### **3.7.1.1. Dane silnika i samochodu**

Dane silnika dotyczą przede wszystkim określenia sumy momentu bezwładności ( $I$ ) ruchomych części silnika sprowadzonych do osi obrotu wału korbowego.

Jeżeli jednak w trakcie badania samochód znajdował się w ruchu i zjawiska bezwładności dotyczyły nie tylko samego silnika, ale także bezwładności całego pojazdu oraz momentu bezwładności kół jezdnych – należy wszystkie te wartości również uwzględnić, zredukować do osi obrotu wału korbowego i zsumować z momentem bezwładności  $I$ .

Interesująca jest jedynie suma momentów bezwładności, a nie jej poszczególne składowe, a więc można ją łatwo wyznaczyć lub otrzymać od producenta pojazdu.

Moment obrotowy oporów własnych silnika nie jest wymagany, ale jeżeli samochód w trakcie badania znajdował się w ruchu, należy podać także funkcję sumy oporów ruchu ( $M_o(\omega)$ ) sprowadzonych do momentu obrotowego wału korbowego silnika zależną od prędkości kątowej wału korbowego ( $\omega$ ). Podobnie, jak wyżej, interesująca jest jedynie suma oporów, a nie jej wszystkie składowe, dlatego można je dość łatwo wyznaczyć lub obliczyć mając dane od producenta samochodu jego parametry. Wystarczy wykonać podstawowe obliczenia trakcyjne.

Jeżeli w badaniu silnika bierze udział układ przeniesienia napędu (sprzęgło nie jest rozłączone), należy również znać podstawowe parametry tego układu, jak: przełożenia skrzyni biegów, przekładni głównej, promień dynamiczny opony oraz sprawności przenoszenia napędu przez kolejne elementy układu. Służą one wyznaczeniu funkcji oporów ruchu oraz momentu bezwładności  $I$ .

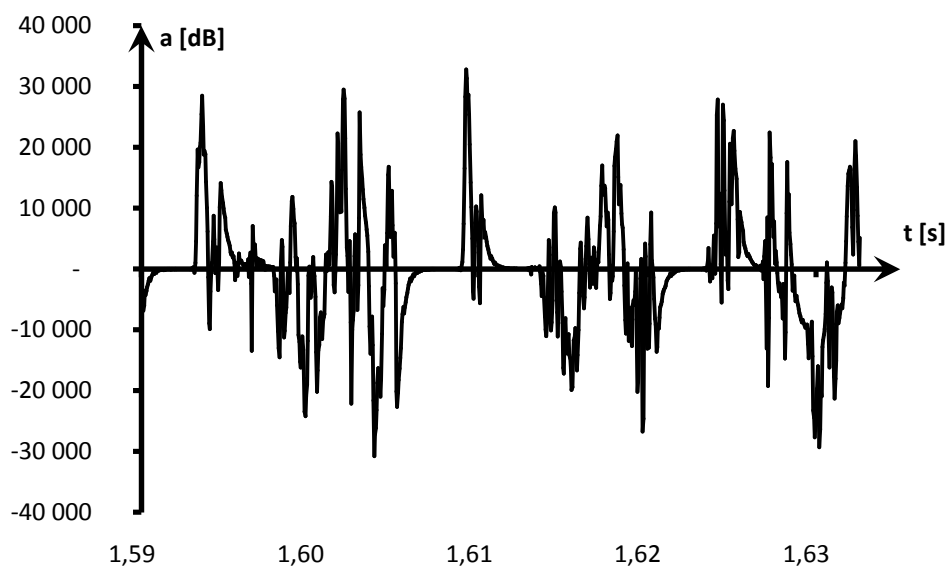
Podsumowując – należy podać sumę momentów bezwładności  $I$  oraz funkcję sumy oporów na wale korbowym  $M_o(\omega)$  zależną od prędkości obrotowej wału korbowego.

#### **3.7.1.2. Sygnał dźwiękowy**

Sygnał dźwiękowy jest wczytywany jako pojedynczy wektor zawierający kolejne wartości ciśnienia akustycznego. Znana jest też częstotliwość, z jaką próbkowano ten sygnał. Na jej podstawie tworzy się dodatkowy wektor czasu, stanowiący dziedzinę funkcji ciśnienia akustycznego. Wartości funkcji ciśnienia akustycznego mogą być od tej pory interpretowane jako amplituda sygnału dźwiękowego.



Rysunek 3.2. przedstawia przykładowy fragment przebiegu ciśnienia akustycznego w czasie. Widoczna jest na nim nieregularność przebiegu wynikająca z dużych zakłóceń. W dalszej części algorytmu będzie konieczne ich wyeliminowanie.



Rys. 3.2. Fragment przebiegu amplitudy sygnału (a) w czasie (t).

### 3.7.2. Przygotowanie sygnału

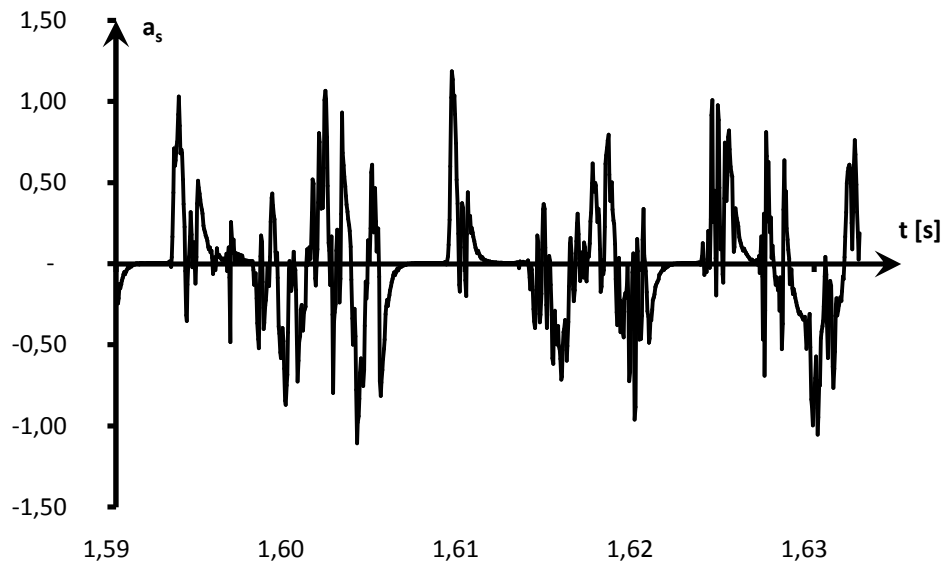
Gdyby w ten sposób wczytany sygnał poddać analizie czasowo-częstotliwościowej, rezultat nie byłby użyteczny, ponieważ przebieg sygnału zawiera zbyt dużą ilość szeroko pojętego szumu. Należą do niego informacje o zjawiskach przypadkowych, zmierzonych i zarejestrowanych przez dyktafon, informacje o zakłóceniach pracy silnika (na przykład o nierównomierności biegu, czy o ewentualnym wypadaniu zapłonów), informacje o zjawiskach nie pochodzących z pracy silnika oraz informacje o zjawiskach związanych z niedokładnością pomiaru, a nawet szum kwantyzacji występujący przy zapisie cyfrowym.

Przygotowanie sygnału ma za zadanie tak zmodyfikować wektor sygnału, aby był on przydatny do analizy czasowo-częstotliwościowej.

#### 3.7.2.1. Standaryzacja sygnału

Pierwszym zabiegiem, jakiemu poddawany jest sygnał jest jego standaryzacja. Oznacza to sprowadzenie wartości średniej amplitudy do zera, a odchylenia standardowego do jedynki. Pozwala to na uniknięcie tak zwanego prążka zerowego w jego widmie częstotliwościowym oraz na ustalenie pozostałych prążków na pożądanym poziomie.

Rysunek 3.3. przedstawia ten sam fragment przebiegu ciśnienia akustycznego, który został pokazany na rysunku 3.2., ale po zastosowaniu zabiegu standaryzacji.



Rys. 3.3. Fragment przebiegu amplitudy sygnału ( $a_s$ ) w czasie ( $t$ ) - po standaryzacji.

### 3.7.2.2. Filtr o zmiennej częstotliwości przepustowości

Częstotliwości występujące w sygnale, niosące informację o prędkości obrotowej silnika, zawierają się w przedziale między 20 Hz (dla 600 obr/min), a 200 Hz (dla 6000 obr/min). Jednocześnie częstotliwości, przy których występują największe wartości szumów, zaczynają się już od 50 Hz. Łatwo zauważyć, że częstotliwości szumów i interesujących informacji pokrywają się. Dlatego nie wystarcza zazwyczaj zastosowanie zwykłego filtra dolnoprzepustowego, jednakowego dla całego sygnału.

Na szczęście zwykle dla każdego odcinka czasowego istnieje pewna częstotliwość graniczna, poniżej której znajduje się interesująca część sygnału, a powyżej której znajdują się informacje niepotrzebne. Dlatego rozwiązaniem jest stosowanie filtrowania o zmieniającej się częstotliwości przepustowości.

Stosuje się w tym celu wstępną analizę czasowo-częstotliwościową (krótkoczasową transformatę Fouriera [6]) o bardzo małej rozdzielczości czasowej – nieprzydatnej do precyzyjnego wyznaczania prędkości obrotowej, ale wystarczającej do wstępnego oszacowania częstotliwości głównych, powyżej których dla każdego odcinka czasowego należy odfiltrować dany fragment sygnału filtrem dolnoprzepustowym. Mała rozdzielczość czasowa wymusza niską wrażliwość na przypadkowe zakłócenia, które trwają znacznie krócej, niż szerokie okno czasowe, przez które przepuszczany był każdy fragment sygnału.

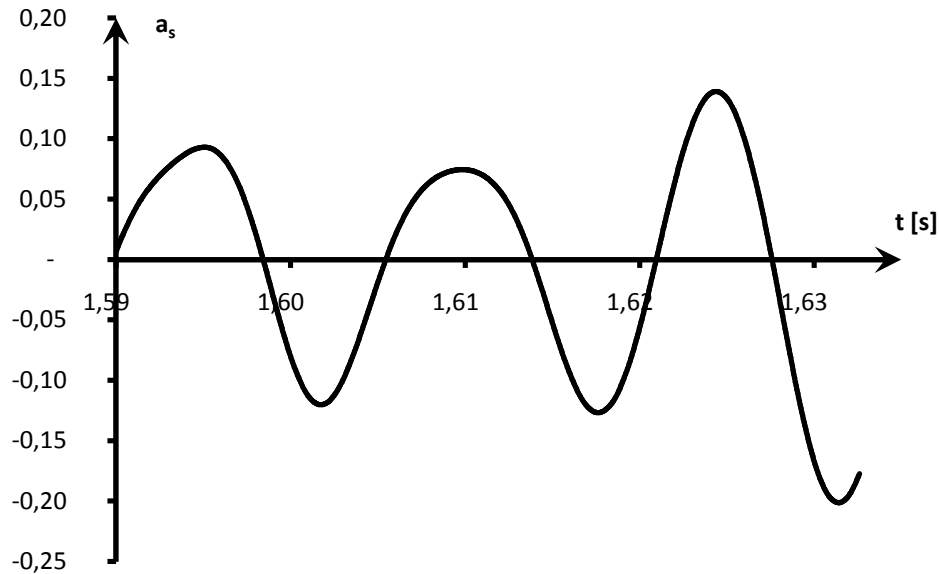
W wypadku, jeśli to rozwiązanie nie jest wystarczające, można obserwować powstałe widmo czasowo-częstotliwościowe i ręcznie określać częstotliwości przepustowości filtra.

W samym procesie filtrowania wykorzystano operację splotu ze specjalnie przygotowaną funkcją filtrującą, obliczoną za pomocą metody okien [6], należącej do grupy filtrów nierekursywnych. Metoda ta zakłada wykonanie kilku głównych kroków.

- zdefiniowanie widma odpowiedzi impulsowej filtra, czyli podanie granicznych częstotliwości: przepustowej i zaporowej oraz akceptowalnych oscylacji w paśmie zaporowym (ponieważ w tym paśmie ważniejsze jest, aby oscylacje były jak najmniejsze);

- stworzenie funkcji czasowej okna parametrycznego (Kaisera) o parametrach kształtu zależnych od akceptowalnej oscylacji w paśmie zaporowym, a długości zależnej od granicznych częstotliwości widma odpowiedzi impulsowej filtra;
- wygenerowanie odpowiedzi impulsowej filtra;
- pomnożenie odpowiedzi impulsowej ze stworzonym oknem czasowym.

Na rysunku 3.4. przedstawiono ten sam fragment przebiegu sygnału, co na rysunkach 3.2. oraz 3.3., ale tym razem po zastosowaniu filtrowania.



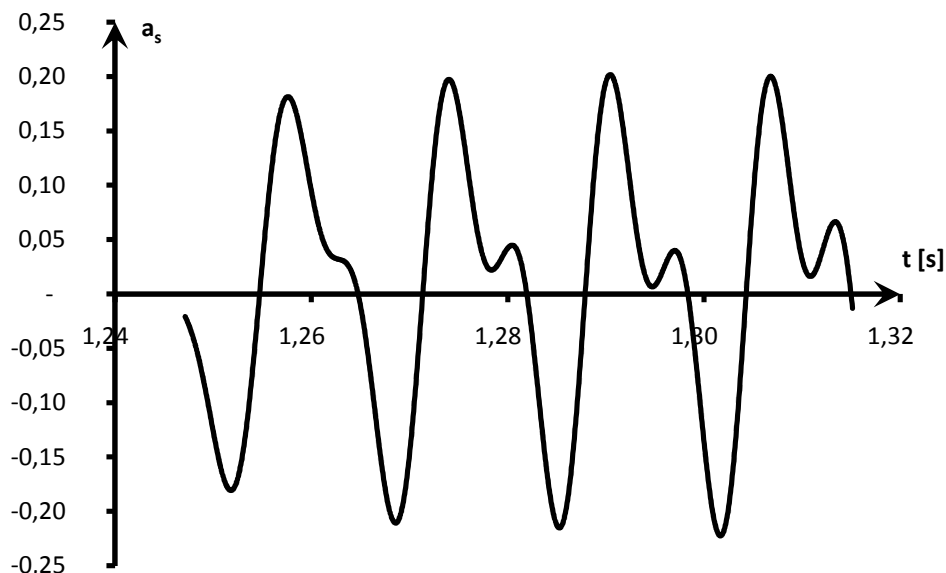
Rys.3.4. przebieg amplitudy sygnału ( $a_s$ ) po filtrowaniu w czasie ( $t$ ).

### 3.7.2.3. Filtr adaptacyjny [6]

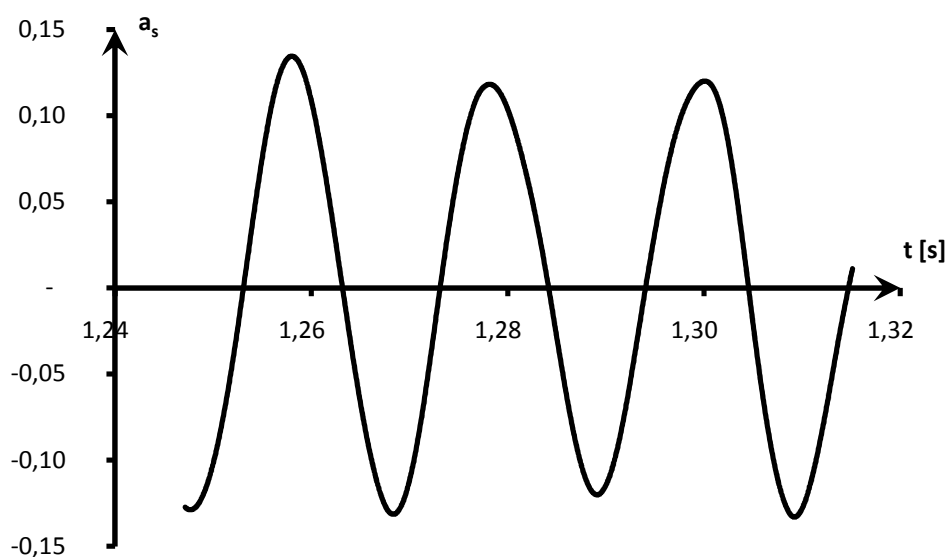
Oprócz pewnych stale występujących zakłóceń sygnału czasami spotyka się też drobne zakłócenia nakładające się na częstotliwości główne sygnału. Nie jest możliwe wówczas odfiltrowanie ich zwykłym filtrem.

W takich wypadkach stosuje się filtr adaptacyjny. Jego założeniem jest ciągle dostosowywanie się do zmiennych parametrów sygnału, wychwytywanie i usuwanie szumu oraz innych zakłóceń. Zasada działania sprowadza się do zastosowania układu o zmiennej transmitancji. Układ sterujący śledzi przebieg pewnego sygnału „wzorcowego” i tak dobiera parametry owej transmitancji, aby możliwie jak najwierniej go odtworzyć za pomocą modyfikacji wprowadzanego sygnału oczyszczanego. Ideałem byłoby, gdyby przebiegiem „wzorcowym” był doskonały sygnał, pozbawiony jakichkolwiek zakłóceń. Oczywiście jest jednak, że takim przebiegiem nie dysponuje się przed zastosowaniem filtrowania. Można go więc zastąpić zadaniem sygnałem filtrowanym lecz przesuniętym w fazie o pewną liczbę próbek. Układ sterujący filtrem adaptacyjnym będzie próbował tak dobrać parametry transmitancji, aby odtworzyć ten sam przebieg. Jednak jego spowolniony czas reakcji nie pozwoli na idealne odwzorowanie wszystkich szumów i zakłóceń. W efekcie na wyjściu z filtra pojawi się sygnał w dużej mierze pozbawiony niepożądanych zachwiań. Odpowiednio dobierając liczbę próbek, o które przebieg wzorcowy jest przesunięty w fazie względem przebiegu oczyszczanego, można sterować parametrami filtrowania.

Na rysunku 3.5. przedstawiono fragment sygnału obarczonego zakłóceniami niemożliwymi do odfiltrowania za pomocą zwykłego filtra, opisanego w poprzednim podrozdziale. Rysunek 3.6. pokazuje ten sam fragment sygnału po zastosowaniu filtra adaptacyjnego. Sygnał jest wolny od wcześniejszych zakłóceń, ale widoczna jest również zmiana częstotliwości głównej sygnału (początkowo w tym samym odcinku czasu mieściły się 4 okresy, a potem jedynie 3,25).



Rys. 3.5. Przebieg amplitudy sygnału ( $a_s$ ) przed zastosowaniem filtrowania adaptacyjnego w czasie ( $t$ ).



Rys. 3.6. Przebieg amplitudy sygnału ( $a_s$ ) po zastosowaniu filtra adaptacyjnego w czasie ( $t$ ).

Należy więc zwrócić szczególną uwagę na niebezpieczeństwa związane z procesem filtrowania tą metodą. Często zdarza się, że w wyniku zastosowania filtra adaptacyjnego sygnał jest „oczyszczany” z zakłóceń do tego stopnia, że modyfikacji podlega również jego główna częstotliwość składowa. Dlatego należy stosować ten rodzaj filtrowania jedynie wtedy, kiedy filtr opisany w poprzednim podrozdziale okazuje się niewystarczający.

### 3.7.3. Tworzenie widma czasowo-częstotliwościowego

Następnym etapem algorytmu jest wyznaczenie widma czasowo-częstotliwościowego. Można go zrealizować na dwa sposoby – w zależności od potrzeb:

- za pomocą krótkoczasowej transformaty Fouriera,
- za pomocą krótkoczasowej metody podprzestrzeni (MUSIC).

Zanim będzie można zdecydować, które rozwiązanie zastosować, należy zwrócić uwagę na jeden, bardzo ważny problem związany z niewielką liczbą próbek w każdym przedziale czasu, a także z krótkim czasem trwania analizowanych sygnałów. Aby lepiej zilustrować problem, warto jest zauważyć, że silnik pracujący z prędkością obrotową wału korbowego 1000 obr/min, wykonuje jeden obrót w ciągu 0,06 s. Z kolei analizowany pojedynczo przedział czasu może wynosić nawet 0,05 s – w zależności od długości przyjętego okna czasowego. Jest to czas, w którym wał korbowy silnika (którego częstotliwość obrotowa jest poszukiwana) nie zdąży nawet wykonać pełnego obrotu. Dlatego zastosowana metoda musi cechować się możliwością analizy na podstawie bardzo krótkich przebiegów.

Tam, gdzie jest to konieczne, stosuje się metodę podprzestrzeni, jako bardziej precyzyjną w wypadku tak krótkich przebiegów czasowych. Jednak wszędzie, gdzie istnieje możliwość zastosowania nieco dłuższego okna czasowego, używa się transformaty Fouriera, jako prostszej i dzięki temu - bardziej niezawodnej.

W obydwu rozwiązaniach pierwszym etapem jest podział całego sygnału na odcinki, dlatego ten punkt omówiony został osobno.

#### 3.7.3.1. Podział sygnału

Podział całego sygnału na odcinki polega na przepuszczaniu go przez kolejne okna czasowe, zachodzące na siebie. Interesujące są tutaj dwa parametry: długość okna oraz stopień zachodzenia na siebie okien.

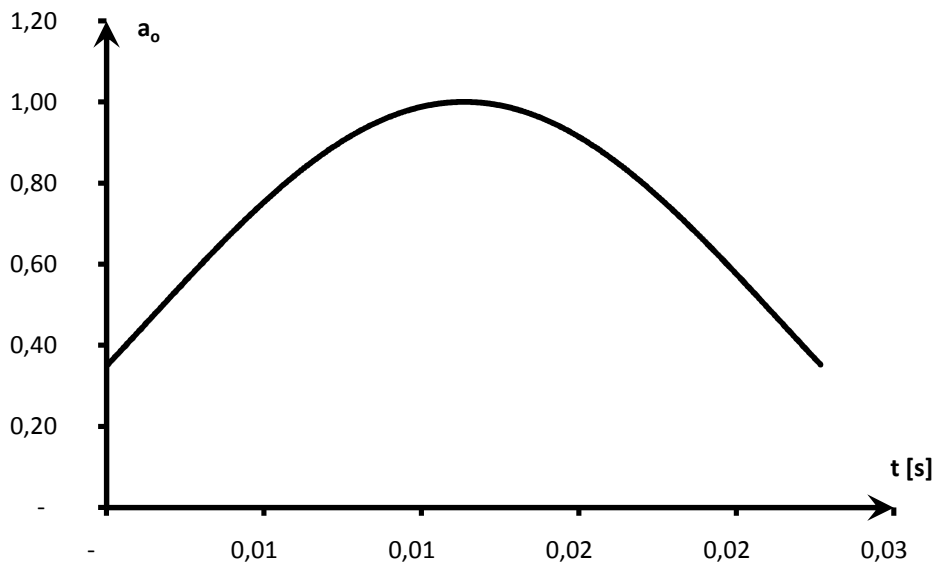
Długość okna można wyznaczyć z warunku równości kątów, mówiącego, że stosunek średniokwadratowej szerokości częstotliwościowej do czasowej powinien być równy stosunkowi przyrostu częstotliwości do odpowiadającego mu przyrostu czasu. Poprawność tego wyboru można również łatwo ocenić lub dobrać na podstawie powstającej (w następnym etapie) trójwymiarowej funkcji czasowo – częstotliwościowej. Należy przy tym pamiętać o praktycznych niebezpieczeństwach związanych z nieprawidłowym doбором długości okien. Zbyt długie okna czasowe będą powodem nadmiernego „wygładzenia” charakterystyki prędkościowej w taki sposób, że wszelkie dynamiczne zmiany momentu obrotowego nie będą widoczne lub będą widoczne w mniejszym stopniu. Z kolei zbyt krótkie okno czasowe spowoduje występowanie błędów w wyznaczaniu wartości zarówno prędkości obrotowej, jak i momentu obrotowego. Powstała charakterystyka prędkościowa może wówczas przedstawiać pewne dynamiczne zmiany wartości momentu obrotowego, nie występujące w rzeczywistości podczas pracy silnika.

Z kolei zachodzenie na siebie okien stosuje się w celu zwiększenia liczby punktów czasowych, jedynie po to, aby uśrednić je w czasie. Nie można bowiem w ten sposób zapobiec zjawisku niejednoznaczności i wytworzyć lepszej rozdzielczości czasowej,

zachowując jednocześnie dobrą rozdzielczość częstotliwościową. W wyniku podziału generowana jest macierz sygnału oraz nowy wektor czasu. W macierzy, w każdym kolejnym wierszu znajduje się kolejny fragment sygnału. Kolejne wartości w nowym wektorze czasu różnią się od siebie o wartość czasu trwania fragmentów sygnału w poszczególnych wierszach macierzy.

W celu usunięcia zakłóceń związanych z podziałem całego przebiegu na odcinki na krańcach przedziałów przepuszcza się każdy fragment przez okno czasowe. Stosuje się tutaj okno parametryczne Kaisera, z podaniem niewielkiej czułości (na przykład 20 dB), żeby nie powodować powiększenia wartości nieistotnych, mniejszych składowych harmonicznnych.

Rysunek 3.7. przedstawia kształt parametrycznego okna Kaisera wygenerowanego w toku obliczeń.



Rys. 3.7. Przebieg amplitudy ( $a_0$ ) okna czasowego Kaisera w czasie ( $t$ ).

### 3.7.3.2. Krótko-czasowa transformata Fouriera [6]

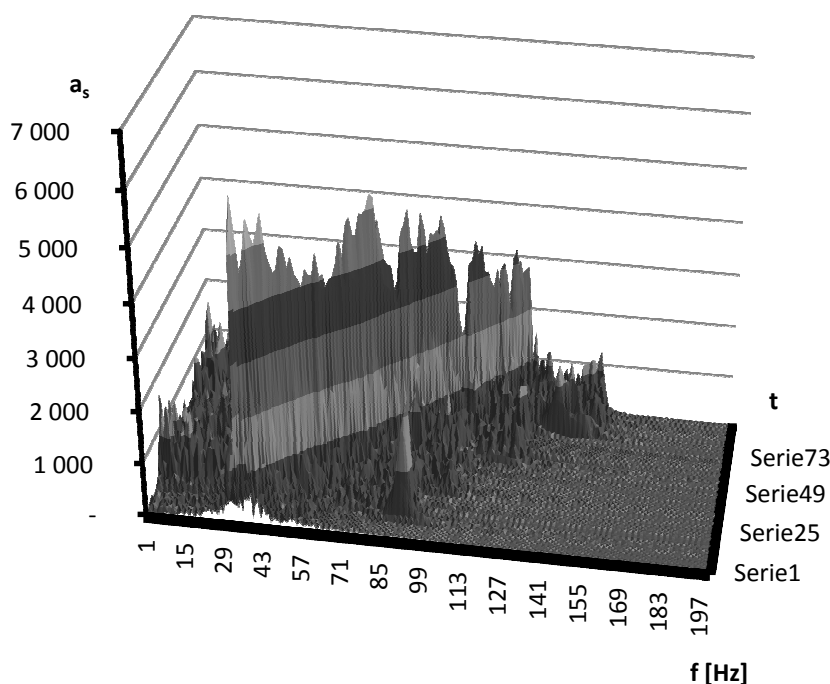
Krótkoczasowa transformata Fouriera jest narzędziem do analizy sygnałów niestacjonarnych, polegającym na poddawaniu transformacie Fouriera kolejnych, krótkich odcinków czasowych.

Ponieważ podział na odcinki został już dokonany w poprzednim podpunkcie, pozostało jedynie poddać analizie Fouriera każdy wiersz powstałej macierzy. Zapisywane wielkości są wartościami bezwzględnymi liczb zespolonych powstałych w wyniku transformaty. Nie jest to widmowa gęstość mocy, ponieważ powstałe wartości bezwzględne nie są podnoszone do drugiej potęgi. Zabieg ten jest zbędny (z punktu widzenia złożoności obliczeniowej algorytmu), ponieważ nie wpływałby w większym stopniu na odnajdywanie maksymalnych wartości wyznaczonej macierzy.

W efekcie zostaje utworzona macierz widmowa, dla której kolejne wiersze odpowiadają kolejnym chwilom czasu, a kolumny – częstotliwościom. Oprócz tego generowany jest wektor dziedziny częstotliwości.

Ponieważ widmo powstające z transformaty Fouriera jest symetryczne, do celów dalszej jego analizy celowe jest odrzucenie części funkcji, odpowiadającej częstotliwościom większym od połowy częstotliwości próbkowania. W praktyce jednak odrzuca się część funkcji odpowiadającą częstotliwościom znajdującym się powyżej największej wartości częstotliwości przepustowej w stosowanych filtrach dolnoprzepustowych (omówionych w podrozdziale 3.7.2.2. - Filtr o zmiennej częstotliwości przepustowości), ponieważ ta część widma nie niesie ze sobą żadnych interesujących informacji o sygnale (została nawet celowo stłumiona za pomocą filtra).

Fragment tak przygotowanej macierzy widmowej został przedstawiony na rysunku 3.8 za pomocą wykresu funkcji trójwymiarowej.



Rys. 3.8. Trójwymiarowa funkcja zależności amplitudy sygnału ( $a$ ) od częstotliwości ( $f$ ) i czasu ( $t$ ).

### 3.7.3.3. Krótkoczasowa metoda podprzestrzeni – MUSIC [6]

Krótkoczasowa metoda podprzestrzeni (MUSIC) jest również narzędziem do analizy częstotliwościowej kolejnych, krótkich odcinków czasu. Jednak w tym wypadku owe odcinki czasu mogą być znacznie krótsze, a ich analiza nie jest jedynie zwykłą transformatą Fouriera.

Zakłada ona następujące postępowanie. Tworzona jest macierz autokorelacji – w taki sposób, żeby w każdym kolejnym wierszu mieściła się funkcja autokorelacji przesunięta w fazie o jedną próbkę. Powstała macierz jest kwadratowa i ortogonalna.

Następnie dokonuje się jej dekompozycji na wektory własne i wartości własne. Należy zauważyć, że każdy z nich będzie prostopadły do pozostałych. Można je w takim razie interpretować, jako wektory wytyczające kierunki pewnej przestrzeni – o takiej liczbie wymiarów, ile jest wektorów (czyli nie więcej, niż wynosi rząd macierzy). Do dalszej analizy

będą wykorzystywane niektóre z nich, stanowiące pewną podprzestrzeń. Stąd wzięła się nazwa: metoda podprzestrzeni.

Ponieważ każdy z tych wektorów będzie w sobie niósł pewną informację o sygnale, można się spodziewać, że niektóre wektory będą bardziej odpowiedzialne za informację o szumie, a inne za składowe harmoniczne. Oczywiście, gdyby założyć, że choć jeden wektor przedstawia jedynie główną składową harmoniczną, wystarczyłoby zbadać tylko jego, aby otrzymać idealne rozwiązanie. Niestety takie założenie zwykle nie będzie prawdziwe, ponieważ jest bardzo małe prawdopodobieństwo, że cała informacja o głównej składowej znajdzie się akurat w jednym wektorze. Natomiast jest o wiele bardziej prawdopodobne, że w pewnym wektorze informacja o głównej składowej wcale się nie znajdzie. Celowe byłoby analizowanie właśnie tego wektora i ocena, jakie częstotliwości w nim nie występują. Prawdopodobnie byłyby to właśnie częstotliwości odpowiadające za przebiegi harmoniczne. Takie podejście jest nazywane metodą Pisarenki.

Tutaj jednak bierze się pod uwagę dużo więcej wektorów. Odrzucane są tylko te, co do których można się spodziewać, że zawierają już informacje o składowych harmonicznym, tak więc ich liczba zależy od tego, ile składowych należy wykryć w badanym sygnale. Ponieważ w tym wypadku interesująca jest tylko jedna, główna harmoniczna, badane są prawie wszystkie wektory. Wybierane są te, którym odpowiadają możliwie jak najmniejsze wartości własne macierzy autokorelacji, gdyż właśnie dla nich istnieje najmniejsza szansa wykrycia elementów skorelowanych.

Wybrane wektory poddaje się transformacji Fouriera, a otrzymane widma sumuje się. Należy się spodziewać, że w każdym widmie dla jednej - wspólnej dla wszystkich - częstotliwości wartość funkcji będzie niewielka. Jest to poszukiwana częstotliwość głównej składowej harmonicznym. Powinna ona być bardzo dobrze widoczna po zsumowaniu widm.

Wynik przedstawia się w skali logarytmicznej, po odjęciu od jedynki, aby dla poszukiwanej częstotliwości powstało maksimum, zamiast minimum. Efektu takiego zabiegu nie można interpretować, jako widmowej gęstości mocy całego sygnału z co najmniej dwóch powodów. Po pierwsze, przedstawiona jest tylko jedna składowa harmoniczna, zamiast całej gamy wszystkich, występujących w sygnale. Po drugie efekt końcowy jest sumą pewnej liczby widm składowych, przez co trudna jest interpretacja samych wartości funkcji. Chociaż teoretycznie stanowią one estymaty widmowej gęstości mocy, jako widma Fouriera funkcji autokorelacji, jednak często przyjmują na przykład wartości ujemne.

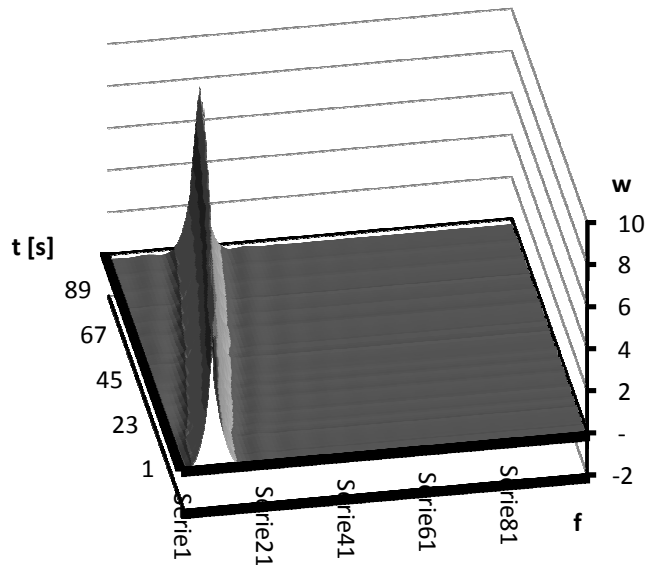
W związku z tym, w celu wizualizacji, przydatna jest standaryzacja poszczególnych widm. W efekcie powstaje macierz widmowa, dla której (podobnie jak w poprzednim podpunkcie) kolejne wiersze odpowiadają kolejnym chwilom czasu, a kolumny - częstotliwościom. Oprócz tego również generowany jest wektor dziedziny częstotliwości.

Dla celów tej pracy powstała wielkość będzie nazywana wskaźnikiem amplitudy - czyli suma transformat Fouriera wybranych wektorów własnych macierzy autokorelacji po odjęciu od jedynki i po standaryzacji.

Ponieważ otrzymane w ten sposób widmo jest symetryczne, gdyż jest między innymi efektem transformaty Fouriera, dokonuje się odrzucenia jego części w ten sam sposób, jak to zostało opisane w poprzednim podrozdziale (i z tych samych powodów).



Fragment tak przygotowanej macierzy widmowej został przedstawiony na rysunku 3.9 za pomocą wykresu funkcji trójwymiarowej. Widoczna jest tam bardzo duża jednoznaczność maksimów występujących w każdym kolejnym wierszu macierzy (dla każdej kolejnej wartości czasu). Taka funkcja jest bardzo użyteczna do dalszych obliczeń.



Rys. 3.9. Trójwymiarowa funkcja zależności wskaźnika amplitudy ( $w$ ) od częstotliwości ( $f$ ) i czasu ( $t$ ).

#### 3.7.4. Obliczanie prędkości obrotowej

W metodzie dźwiękowej poczyniono założenie (opisane w rozdziale 3.3.), według którego główną przyczyną rejestrowanego dźwięku są wybuchy mieszanki palnej w cylindrach. Dlatego należy się spodziewać, że częstotliwości główne sygnału będą odpowiadały bezpośrednio częstotliwości zachodzenia tychże wybuchów, a pośrednio prędkości obrotowej wału korbowego silnika.

Badania przeprowadzone w pod tym kątem (opisane w rozdziale 3.3.) potwierdziły powzięte przypuszczenia.

W związku z tym w celu wyznaczenia prędkości obrotowej należy dla każdego odcinka czasowego określić częstotliwość, przy której występuje pik wartości widma.

##### 3.7.4.1. Znajdowanie maksimów na widmie czasowo-częstotliwościowym

Ze względu na charakter pików, które nie są idealnie symetryczne, warto jest nie poprzestawać na odnajdowaniu częstotliwości, dla których występują wartości maksymalne. Maksimum może bowiem nie być środkiem piku. Dlatego wyznaczana jest średnia ważona częstotliwości punktów należących do czubka piku, gdzie wagą jest wartość funkcji. Czubek piku można by zdefiniować, jako przedział, w którym wartość nie spada poniżej 75% wartości maksymalnej. Jednak ze względu na ewentualne drobne zakłócenia, które mogą powodować „uskoki” do niższych wartości, lepiej zdefiniować go jako przedział, w którym średnia arytmetyczna wartości funkcji nie spada poniżej 75% wartości maksymalnej.

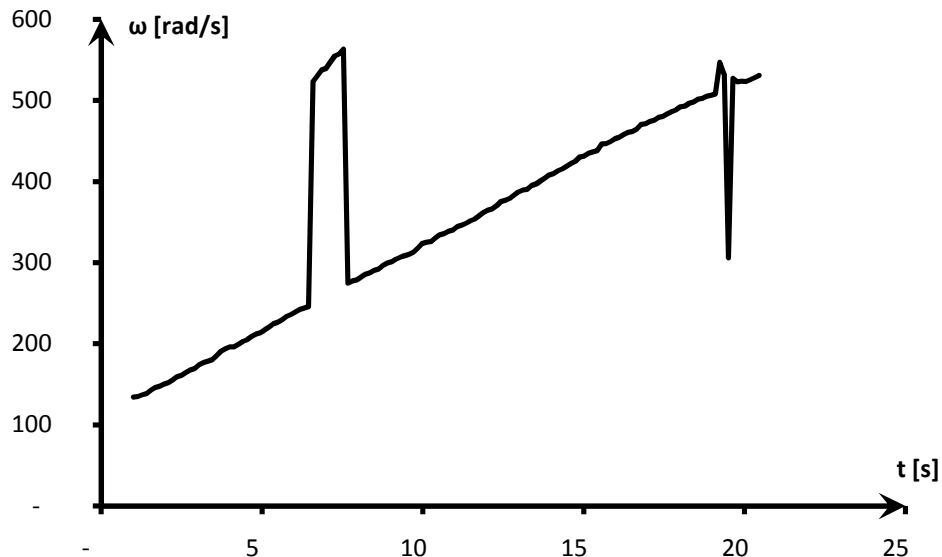
W efekcie otrzymuje się wektor, dla którego każda liczba odpowiada głównej częstotliwości pracy silnika dla kolejnych chwil czasu wyrażonej w hercach.

#### 3.7.4.2. Zamiana częstotliwości dźwięku na prędkość obrotową

Zgodnie z wnioskami przedstawionymi w rozdziale 3.3., do obliczenia wartości prędkości obrotowej wykorzystano wzór 3.6., gdzie wartość parametru  $i$  wynosi 2. Z otrzymanych wyników oblicza się wartości prędkości kątowej. W efekcie otrzymano wektor, dla którego każda kolejna liczba odpowiadała wartości prędkości kątowej silnika wyrażonej w radianach na sekundę.

#### 3.7.4.3. Oczyszczenie przebiegu z zakłóceń

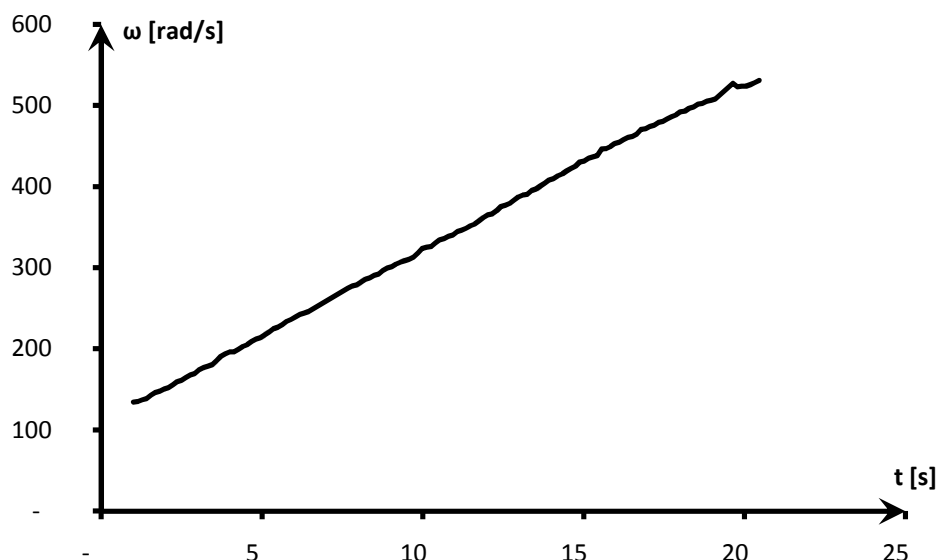
Przebieg prędkości kątowej zależny od czasu zawiera jeszcze elementy niewielkiego szumu (widocznego na rysunku 3.11.), a niejednokrotnie dodatkowe zaburzenia (przedstawione na rysunku 3.10.). Uniemożliwia to pomyślne przeprowadzenie dalszych operacji – przede wszystkim różniczkowania.



Rys. 3.10. Przebieg prędkości kątowej wału korbowego silnika ( $\omega$ ) w czasie ( $t$ ) – z dużymi zakłóceniami.

Konieczne jest wyeliminowanie w pierwszej kolejności dużych zakłóceń. W tym celu śledzi się cały przebieg i sprawdza, czy różnica między daną wartością prędkości, a poprzednią nie jest większa niż 100 rad/s. Jeśli jest, dany element zostaje usunięty z przebiegu. Jednocześnie należy usunąć odpowiadający mu element z przebiegu czasu. W efekcie oba wektory ulegają skróceniu.

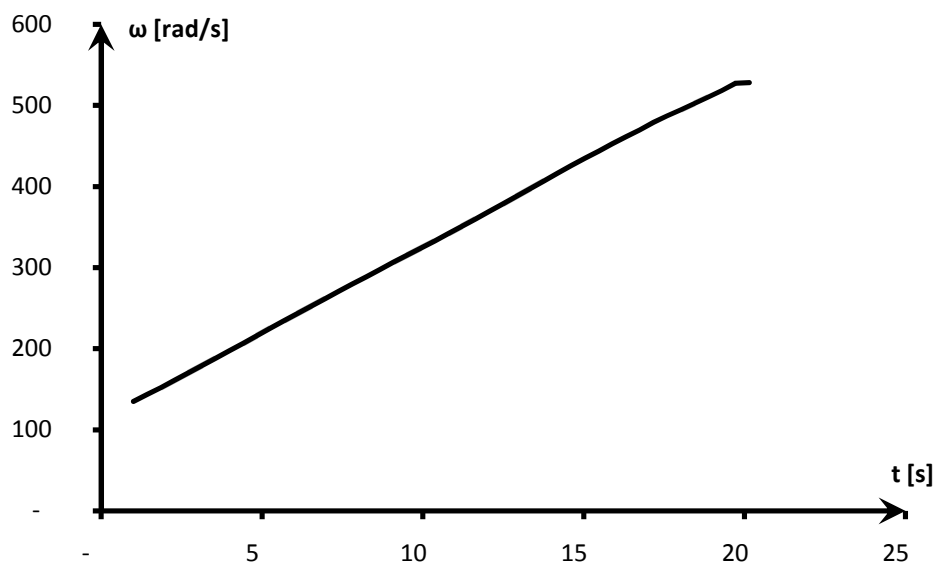
Podobnie usuwa się wszystkie wartości, dla których dany element jest mniejszy od poprzedniego o więcej niż 10 rad/s. Formalnie należałoby usunąć wszystkie elementy malejące, ale wówczas ze względu na szum zostałyby usunięte zbyt wiele z nich.



Rys. 3.11. Przebieg prędkości kątowej wału korbowego silnika ( $\omega$ ) w czasie ( $t$ ) – bez dużych zakłóceń, ale z widocznym niewielkim szumem.

Po takim wstępnym „oczyszczeniu” przebiegu prędkości należy jeszcze wyeliminować skutki niewielkiego szumu. Istnieje potrzeba wygładzenia wykresu. Nie sprawdzają się przy tym zadaniu wszelkiego rodzaju filtry, które albo nie oczyszczają przebiegu prędkości z wystarczającą dokładnością, albo wprowadzają dodatkowe jego zakrzywienia. Stosuje się w związku z tym procedurę wygładzania. Polega ona na takiej modyfikacji, że każdy punkt zastępowany jest wartością średniej ważonej z wartości danego punktu i wartości sąsiadujących (po pięć wartości z każdej strony), gdzie funkcją wagową jest funkcja odległości od aktualnie modyfikowanego punktu. Taki zabieg, dla wszystkich kolejnych punktów jest powtarzany kilkakrotnie – aż do otrzymania gładkiego przebiegu. Zwykle wystarcza przeprowadzenie jednej, dwóch lub trzech operacji wygładzania.

Efekt zastosowania procedury wygładzania przedstawiono na rysunku 3.12.



Rys. 3.12. Przebieg prędkości kątowej wału korbowego silnika ( $\omega$ ) w czasie ( $t$ ) – po wygładzeniu.

Po tych zabiegach przebieg prędkości kątowej silnika jest gotowy do przeprowadzania dalszych obliczeń.

### 3.7.5. Obliczanie momentu obrotowego

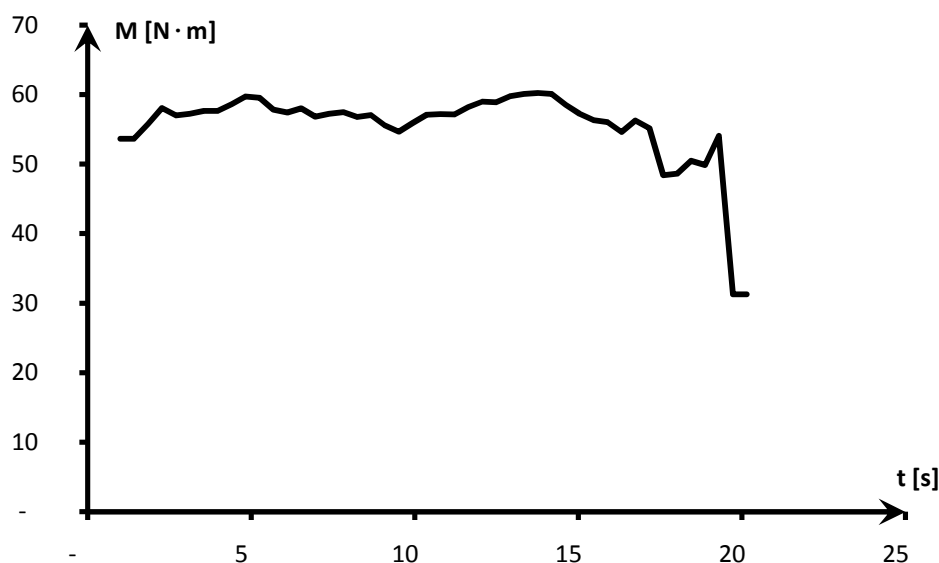
Moment obrotowy silnika jest liczony zgodnie koncepcją obliczeń przedstawioną w podrozdziale 3.3. Wymagane jest w tym celu zróżniczkowanie przebiegu prędkości kątowych silnika.

#### 3.7.5.1. Różniczkowanie przebiegu prędkości kątowej

Zastosowano przybliżanie pochodnej funkcji za pomocą różnicy centralnej [7] z odpowiednio dobranym krokiem (równym 2). W efekcie otrzymano wektor przyspieszeń kątowych wału korbowego silnika wyrażonych w radianach na sekundę do kwadratu.

#### 3.7.5.2. Sposób obliczania momentu obrotowego

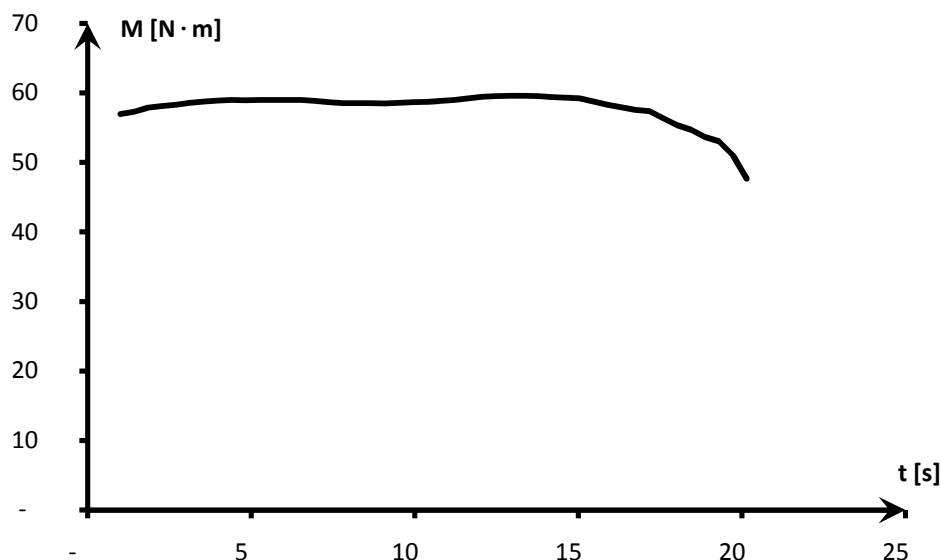
Moment obrotowy silnika ( $M_s$ ) obliczany jest według wzoru 3.3., przy czym wartość sumy momentów bezwładności ( $I$ ) oraz wartość sumy momentów obrotowych oporów ( $M_o$ ) są wartościami danymi (obliczonymi lub wyznaczonymi wcześniej), opisanymi szerzej w podpunkcie 3.7.1.1. Z kolei sposób obliczenia wartości przyspieszeń został opisany w poprzednim podpunkcie. Otrzymuje się w rezultacie wektor wartości momentu obrotowego na wale korbowym silnika wyrażonym w niutonach razy metr. Przykładowy przebieg momentu obrotowego przedstawiony jest na rysunku 3.13.



Rys. 3.13. Przebieg momentu obrotowego silnika ( $M$ ) w czasie ( $t$ ) – przed wygładzeniem.

#### 3.7.5.4. Wygładzenie przebiegu

Operacja różniczkowania bardzo wzmacnia wszelkiego rodzaju zaszumienia przebiegów, dlatego potrzebne jest jego wygładzenie. Odbywa się to w identyczny sposób, jak wygładzanie przebiegu prędkości obrotowej, opisane w drugiej połowie (w czwartym akapicie) podpunktu 3.7.4.3. Zwykle wystarczają tutaj 2 powtórzenia operacji wygładzania. Po wygładzeniu przebieg momentu obrotowego może wyglądać tak, jak to przedstawiono na rysunku 3.14.



Rys. 3.14. Przebieg momentu obrotowego silnika (M) w czasie (t) – po wygładzeniu.

### 3.7.6. Operacje końcowe

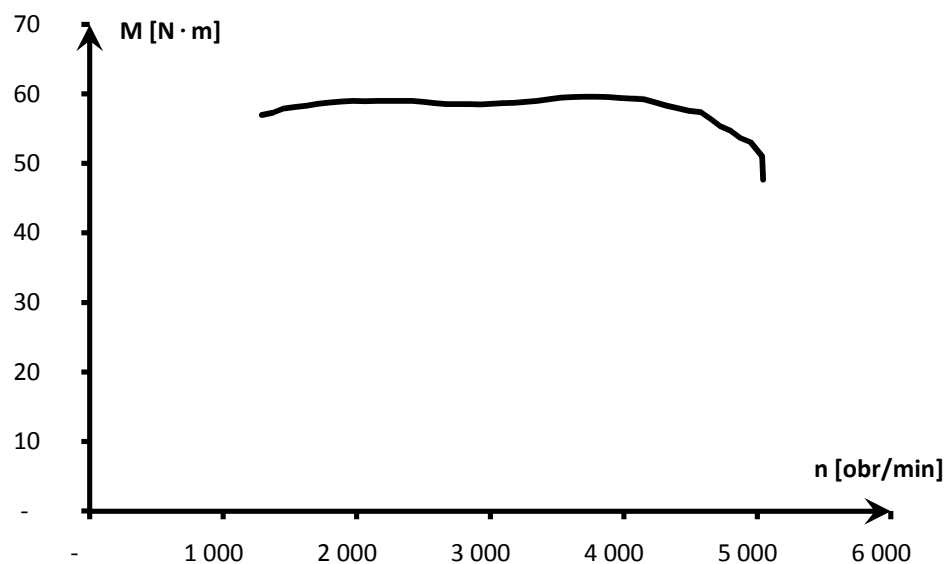
#### 3.7.6.1. Złożenie charakterystyki prędkościowej momentu obrotowego

W przedstawianiu charakterystyki prędkościowej silników przyjęto wyrażać prędkość obrotową za pomocą jednostki: obroty na minutę. Dlatego wartości prędkości wyrażanych dotychczas w radianach na sekundę należy przeliczyć używając wzoru 3.7.

$$n = \frac{\omega \cdot 2 \cdot \pi}{60} \quad 3.7.$$

Powstałe w ten sposób przebiegi czasowe prędkości obrotowej i momentu obrotowego można potraktować jako funkcję parametryczną charakterystyki prędkościowej, gdzie parametrem jest czas. Można bardzo łatwo dokonać „złożenia” tej funkcji do postaci jawnej zależności między prędkością obrotową, a momentem obrotowym. Jest to jedynie uwaga formalna, ponieważ obydwie przebiegi (prędkości i momentu) już istnieją w formie oddzielnych wektorów. Wystarczy więc stwierdzić fakt przyporządkowania ich do siebie.

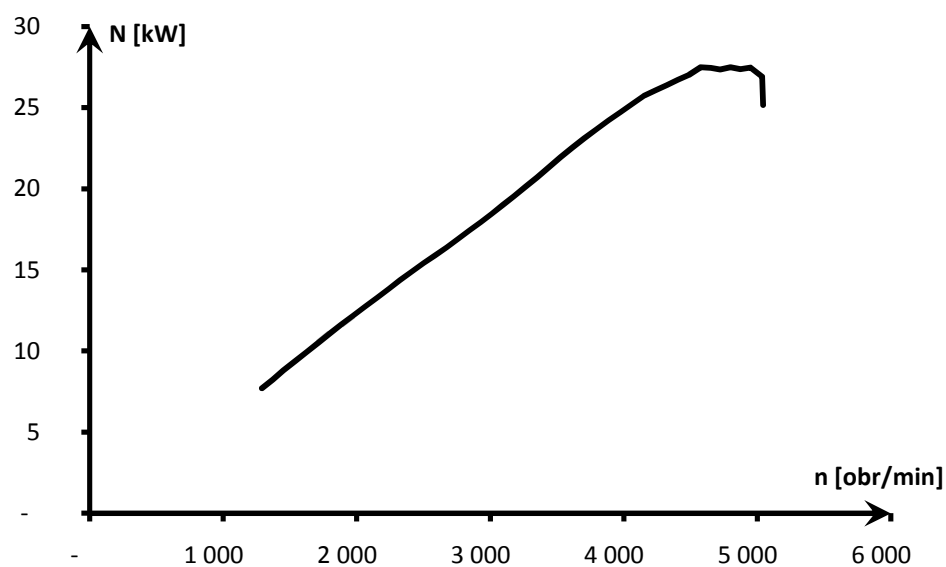
Rysunek 3.15 przedstawia efekt dokonania takiego przyporządkowania, czyli powstałą charakterystykę prędkościową momentu obrotowego.



Rys. 3.15. Charakterystyka prędkościowa momentu obrotowego silnika ( $M$  - moment obrotowy,  $n$  - prędkość obrotowa).

#### 3.7.5.5. Obliczenie charakterystyki prędkościowej mocy

Aby obliczyć moc, wystarczy pomnożyć wartości momentu obrotowego przez wartości prędkości kątowej. Tak powstała charakterystyka prędkościową mocy silnika przedstawiono na rysunku 3.16.



Rys. 3.16. Charakterystyka prędkościowa mocy silnika ( $N$  - moc,  $n$  - prędkość obrotowa).

## **4. Weryfikacja metody wyznaczania charakterystyki prędkościowej**

Oczywistym wydaje się fakt, że nową metodę wyznaczania charakterystyki prędkościowej należy zweryfikować pod kątem poprawności otrzymywanych wyników.

### **4.1. Sposób weryfikacji metody**

W celu weryfikacji metody postanowiono sprawdzić zgodność otrzymywanych za jej pomocą wyników z wynikami z hamowni podwoziowej.

W tym celu samochód umieszczono na stanowisku hamownianym i przeprowadzono badania pozwalające na wyznaczenie charakterystyki prędkościowej. Jednocześnie - w trakcie trwania całego badania – było mierzone i rejestrowane ciśnienie akustyczne w wybranym punkcie komory silnikowej.

Następnie na podstawie nagrania sygnału dźwiękowego wyznaczono charakterystykę prędkościową i sprawdzano, czy jest ona zgodna z wynikami badań hamownianych.

Należało spodziewać się dużej zgodności między charakterystykami, ponieważ pochodziły one nie tylko z jednego obiektu badań, ale także z jednej próby. Dlatego ewentualne rozbieżności mogły pochodzić jedynie z zastosowania różnych metod badawczych.

### **4.2. Przebieg badań hamownianych**

#### **4.2.1. Zastosowane narzędzia i badany obiekt**

Obiektem badań był samochód osobowy marki Polonez Caro 1.5 MR'94 GLE, zasilanym paliwem LPG.

Badania wykonano na hamowni podwoziowej – rolkowej. Była ona wyposażona w komputer sterujący siłą hamowania hamulca oraz rejestrujący mierzone wielkości. Podłączony był do niego także czujnik indukcyjny do pomiaru natężenia prądu w wybranym przewodzie wysokiego napięcia silnika, pozwalający na wyznaczenie prędkości obrotowej wału korbowego silnika.

Do rejestracji sygnału dźwiękowego wykorzystano dyktafon cyfrowy o częstotliwości próbkowania 22 kHz, a rozmiar próbki audio wynosił 4 b, co dawało szybkość transferu 88 kb/s.

#### **4.2.2. Rejestrowane wielkości**

Do rejestrowanych wielkości należały:

- ciśnienie akustyczne w wybranym punkcie komory silnikowej (wielkość mierzona za pomocą dyktafonu),
- prędkość jazdy samochodu (wielkość mierzona za pomocą rolek hamowni),
- moc na kołach samochodu (wielkość rejestrowana przez komputer sterujący hamownią przy użyciu hamulca hamowni),

- prędkość obrotowa wału korbowego silnika (wielkość mierzona za pomocą czujnika indukcyjnego zamocowanego na jednym z przewodów wysokiego napięcia silnika),
- czas – mierzony oddzielnie, którego rejestrowane zmiany nie były wynikiem jednej, stałej częstotliwości próbkowania.

#### **4.2.3. Przebieg czynności badawczych**

Badania poprzedzały podstawowe czynności przygotowawcze.

1. Zwiększono ciśnienie w oponach kół napędowych samochodu do 0,25 MPa w celu poprawienia współpracy kół samochodu z rolkami hamowni.
2. Ustawiono tylne koła (napędowe) samochodu na rolkach hamowni i zabezpieczono pojazd przed możliwością poruszania się.
3. Do rury wydechowej samochodu podłączono odprowadzenie spalin na zewnątrz budynku.
4. Zamontowano czujnik indukcyjny na jeden z przewodów wysokiego napięcia w silniku.
5. Zamiast bagnetu do sprawdzania poziomu oleju zamontowano czujnik temperatury oleju.
6. Przed samochodem umieszczono dmuchawę chłodzącą wymiennik ciepła czynnika chłodzącego silnik samochodu.
7. Następnie rozgrzano silnik do prawidłowej temperatury pracy czynnika chłodzącego (wynoszącej 90°C).

Po tych czynnościach przygotowawczych wykonano szereg prób przyspieszania samochodu – oddzielnie, trzykrotnie dla każdego biegu (od 1 do 4) – w następujący sposób:

- 1) ustawiano prędkość obrotową wału korbowego do minimalnej, z jaką może pracować dany silnik na danym biegu;
- 2) ustawiano możliwe jak najbardziej gwałtownie pedał przyspieszenia w położeniu maksymalnym;
- 3) czekano aż prędkość obrotowa wału korbowego wzrośnie powyżej 5000 obr/min;
- 4) ustawiano pedał przyspieszenia w minimalnym położeniu, aby prędkość obrotowa spadła;
- 5) powtarzano czynności od 1) do 4) tak, aby otrzymać 3 próby dla danego biegu;
- 6) zwiększano bieg o 1 i powtarzano czynności od 1) do 5) aż do zakończenia badań na czwartym biegu.

W czasie trwania tych wszystkich prób mierzono i rejestrowano wszystkie wielkości wymienione w poprzednim podrozdziale.



### 4.3. Przetwarzanie wyników badań hamownianych

Tak, jak wcześniej wspomniano (w podrozdziale 4.2.2), mierzonymi wielkościami z hamowni, były: moc na kołach samochodu, prędkość jazdy samochodu, prędkość obrotowa wału korbowego. Każda z tych trzech wielkości była mierzona za pomocą innego urządzenia – były nimi: hamulec hamowni, czujnik prędkości rolek hamowni, czujnik indukcyjny przepływu prądu (na przewodzie wysokiego napięcia w silniku). Można więc te wszystkie trzy wielkości traktować, jak gdyby były mierzone niezależnie. W takim układzie każda z nich może stanowić podstawę do oddzielnego wyznaczenia charakterystyki prędkościowej w celu porównania ich z charakterystyką wyznaczoną za pomocą weryfikowanej metody dźwiękowej.

Niestety nie było możliwe wyznaczenie charakterystyki prędkościowej łączącej w sobie wyniki pomiarów z hamulca hamowni oraz czujnika prędkości jej rolek, ponieważ nie zachodziła zgodność między tymi pomiarami. Więcej na ten temat zostanie powiedziane w podrozdziale 4.4.

#### 4.3.1. Charakterystyka tworzona z wyników pomiaru czujnika indukcyjnego.

Wielkością zarejestrowaną przez komputer sterujący stanowiskiem hamownianym na podstawie wyników pomiarów czujnika indukcyjnego był przebieg prędkości obrotowej wału korbowego silnika oraz odpowiadające kolejnym wartościom prędkości wartości czasu.

Możliwe było wyznaczenie momentu obrotowego silnika dokładnie na tej samej zasadzie, jak odbywało się to w wypadku metody dźwiękowej. W tym celu należało zróżniczkować przebieg prędkości i wykorzystać go do obliczenia wartości momentu obrotowego wykorzystując wzór 3.3.

Trudnością jednak w tym wypadku było określenie wartości sumy momentów bezwładności ( $I$ ) oraz funkcji sumy momentów obrotowych oporów ( $M_o$ ) zależnych od prędkości kątowej wału korbowego silnika. Sumę momentów oporu stanowiły:

- stały (znany) moment hamujący generowany sztucznie przez hamulec hamowni,
- opory toczenia wynikające ze współpracy kół napędowych samochodu z rolkami hamowni.

Nie występowały tutaj oczywiście opory powietrza, ponieważ samochód w czasie badania nie poruszał się.

Opory toczenia wyznaczono ze wzoru [1]:

$$M_t = f_p \cdot [1 + f_d \cdot (\omega \cdot R \cdot i)^2] \cdot F_n \cdot R \cdot \frac{1}{i} \quad 4.1.$$

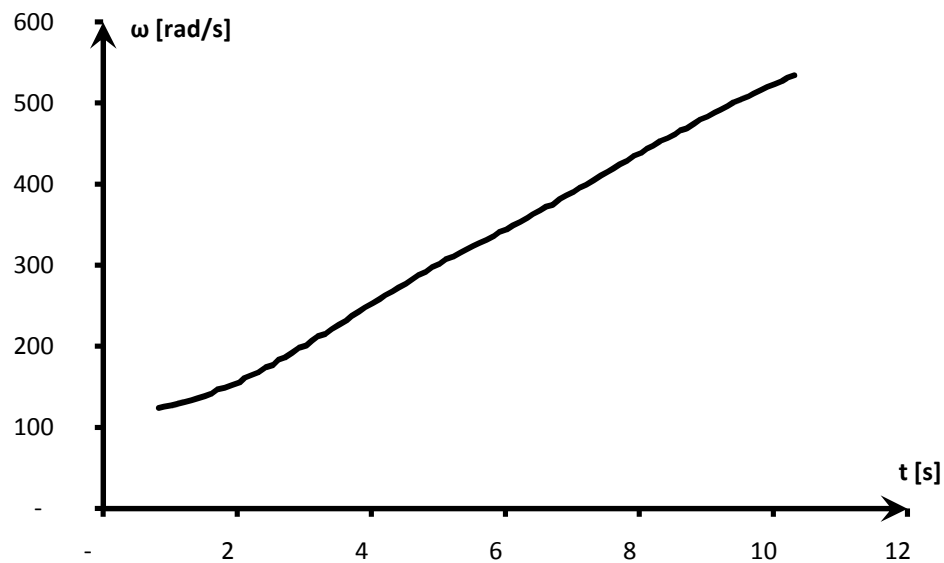
gdzie:  $M_t$  – oznacza poszukiwany moment pochodzący od oporów toczenia wyrażony w N·m,  $f_p$  – podstawowy współczynnik oporu toczenia,  $f_d$  - dodatkowy współczynnik oporu toczenia,  $\omega$  - prędkość kątowa wału korbowego silnika wyrażona w rad/s,  $R$  - promień dynamiczny opony w m,  $i$  – iloczyn przełożeń (przełożenia głównego i całkowitego ze skrzynki biegów - na danym biegu),  $F_n$  – siła nacisku kół napędowych na rolki wyrażona w N.

Wartości parametrów:  $f_p$ ,  $f_d$  oraz wartość sumy momentów bezwładności  $I$  były identyfikowane w taki sposób, aby wartość maksymalna obliczonego w efekcie momentu bezwładności była równa wartości maksymalnej zmierzonej przez hamulec hamowni.

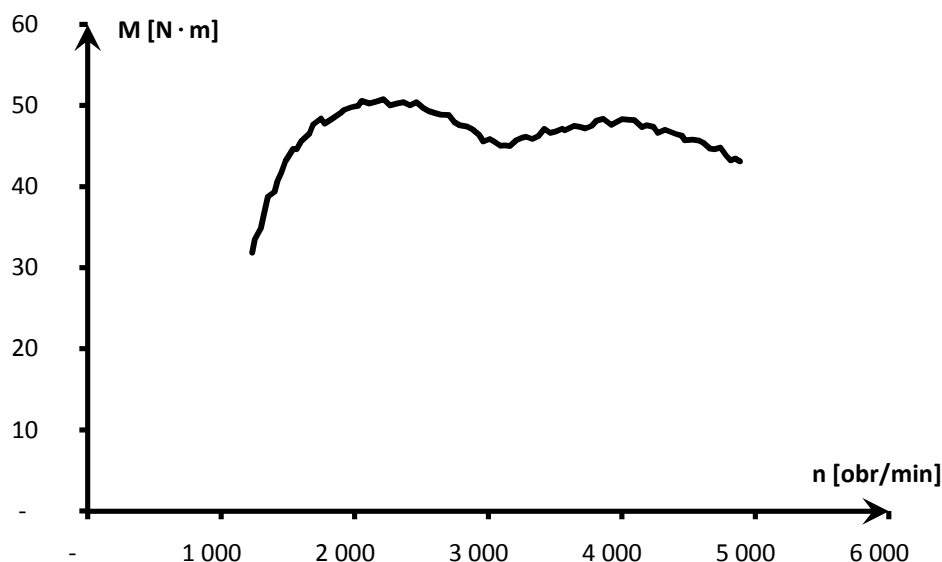
Pozostałe wielkości były łatwe do znalezienia w literaturze motoryzacyjnej [3].

Do współczynników oporów toczenia nie można było zastosować wartości odnalezionych w literaturze, ponieważ przy współpracy koła o innym ciśnieniu ogumienia z rolką hamowni przybierają one zupełnie inne wartości.

Wyznaczenie charakterystyki prędkościowej tą drogą zakończyło się powodzeniem. Zostały w ten sposób wyznaczone takie charakterystyki dla każdego z czterech biegów. Przykładowy przebieg prędkości kątowej w czasie oraz charakterystyka prędkościowa momentu obrotowego wyznaczone w ten sposób zostały przedstawione na rysunkach 4.1. oraz 4.2.



**Rys. 4.1.** Przebieg prędkości kątowych wału korbowego silnika ( $\omega$ ) w czasie ( $t$ ) wyznaczony za pomocą pomiarów z czujnika indukcyjnego.



Rys. 4.2. Charakterystyka prędkościowa momentu obrotowego silnika (M – moment obrotowy, n - prędkość obrotowa) wyznaczona za pomocą pomiarów z czujnika indukcyjnego.

#### 4.3.2. Charakterystyka tworzona z wyników pomiaru prędkości rolek hamowni

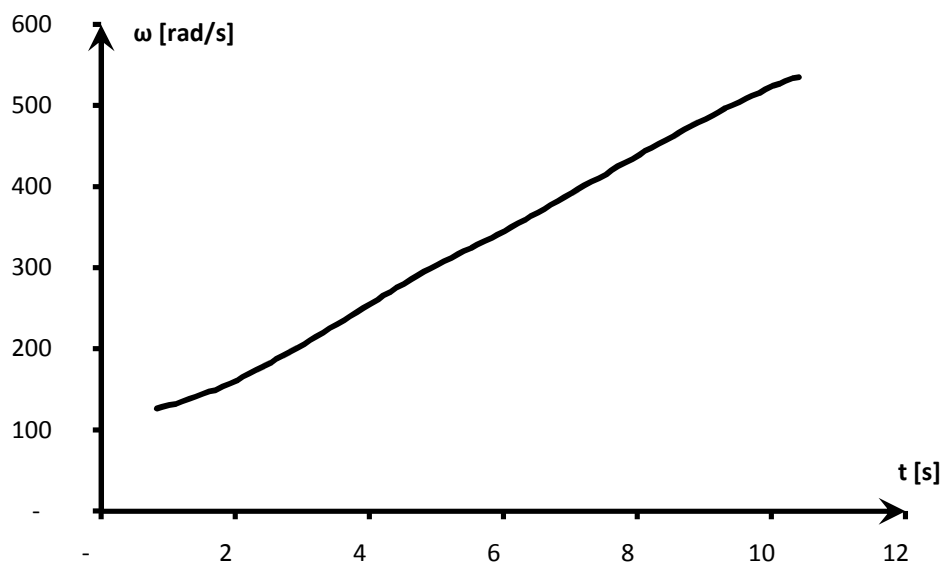
Wielkością zarejestrowaną przez komputer sterujący stanowiskiem hamownianym na podstawie wyników pomiarów prędkości rolek był przebieg prędkości jazdy samochodu (wyrażonej w km/h) oraz oczywiście wartości czasu przyporządkowane każdemu pomiarowi.

Na podstawie tego przebiegu można było wyznaczyć przebieg prędkości kątowej wału korbowego ze wzoru:

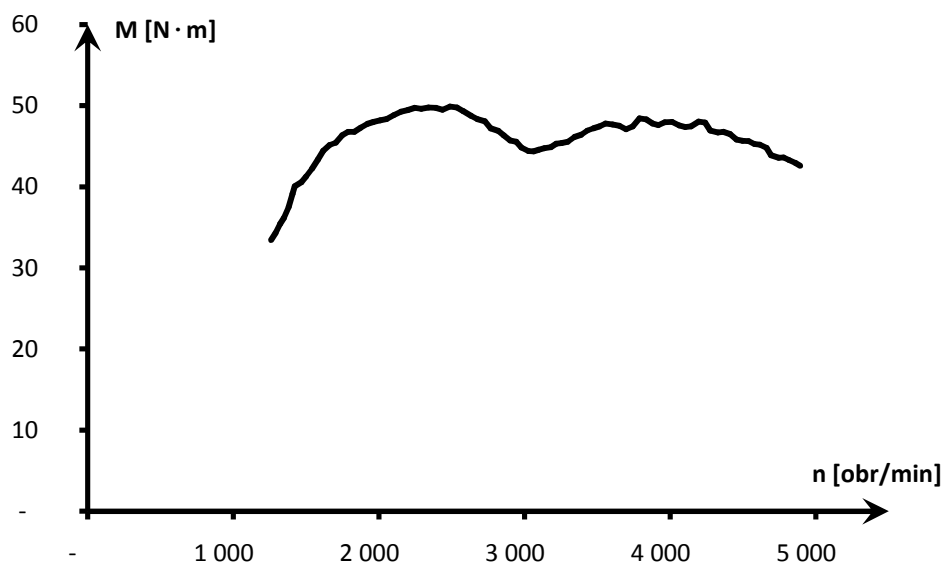
$$\omega = \frac{V}{i \cdot R \cdot 3,6} \quad 4.2.$$

gdzie: V [km/h] - oznacza daną prędkość jazdy samochodu, i - całkowite przełożenie układu przeniesienia napędu, R [m] - promień dynamiczny opony.

Dysponując przebiegiem prędkości kątowych możliwe było wyznaczenie charakterystyki prędkościowej dla każdego z czterech biegów według algorytmu przedstawionego w poprzednim podpunkcie (4.3.1.). Przykładowy przebieg prędkości kątowej w czasie oraz charakterystyka prędkościowa momentu obrotowego wyznaczone w ten sposób zostały przedstawione na rysunkach 4.3. oraz 4.4.



Rys. 4.3. Przebieg prędkości kątowych wału korbowego silnika ( $\omega$ ) w czasie ( $t$ ) wyznaczony za pomocą pomiarów z czujnika prędkości obrotowej rolek hamowni.



Rys. 4.4. Charakterystyka prędkościowa momentu obrotowego silnika ( $M$  – moment obrotowy,  $n$  – prędkość obrotowa) wyznaczona za pomocą pomiarów z czujnika prędkości obrotowej rolek hamowni.

#### 4.3.3. Charakterystyka tworzona z wyników pomiaru za pomocą hamulca hamowni

Wielkością zarejestrowaną przez komputer sterujący stanowiskiem hamownianym na podstawie wyników pomiarów hamulca był przebieg mocy (wyrażony w kW) na kołach samochodu wraz z wartościami czasu przyporządkowanymi każdemu pomiarowi.

Na podstawie tych wielkości również można było wyznaczyć charakterystykę prędkościową. W tym wypadku mniejszy problem stanowiło określenie momentu obrotowego na wale korbowym silnika, ale za to pewną trudność sprawiło wyznaczenie wartości prędkości obrotowej wału korbowego.

Moment obrotowy można było wyznaczyć ze wzoru:

$$M = \frac{N}{1000 \cdot \omega} \cdot \eta \quad 4.3.$$

gdzie:  $M$  [N·m] - moment obrotowy na wale korbowym silnika,  $N$  [kW] - moc (zarejestrowana) na kołach napędowych samochodu,  $\omega$  [rad/s] - prędkość kątowna wału korbowego silnika,  $\eta$  - sprawność ogólna układu przeniesienia napędu z silnika na rolki hamowni.

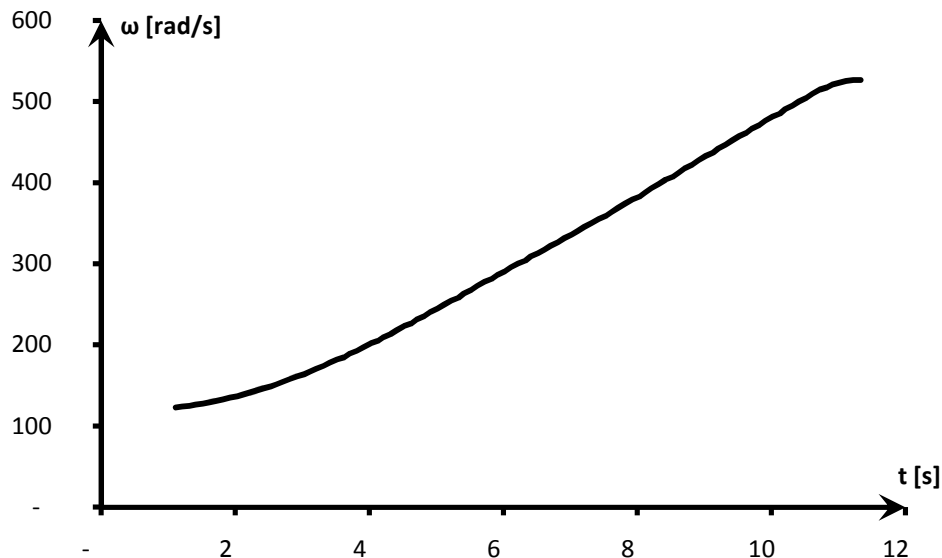
Istniała trudność w podstawieniu do wzoru właściwej prędkości kątowej, ponieważ nie została ona jeszcze wyznaczona z wartości pomiarów hamulca. Dlatego na początku użyto tutaj prędkości kątowej wału korbowego obliczonej na podstawie wyników pomiaru prędkości rolek hamowni (obliczonych w poprzednim podrozdziale ze wzoru 4.2.).

Następnie z obliczonych wartości momentu obrotowego wyznaczono wartości przyspieszeń, po uprzednim przekształceniu tożsamościowym wzoru 3.3., wyznaczając wartości  $M_0$  i  $I$  w identyczny sposób, jak w podrozdziale 4.3.1.

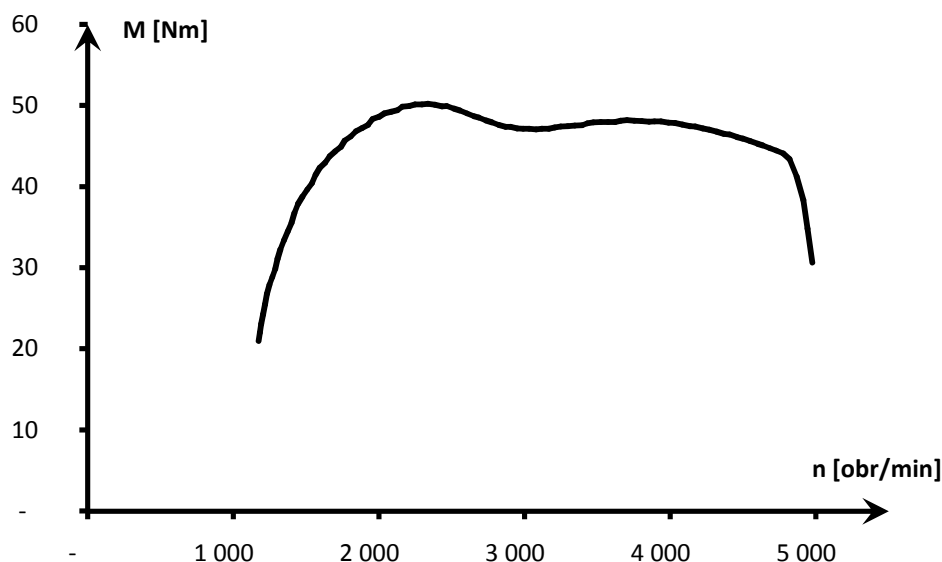
Aby otrzymać wartości prędkości kątowej wału korbowego wystarczyło scałkować przebieg przyspieszeń.

Następnie, mając do dyspozycji tak wyznaczony przebieg prędkości kątowej wału korbowego, można było ponownie obliczyć wartości momentu obrotowego ze wzoru 4.3., ale tym razem w miejsce wartości  $\omega$  podstawiając nowe wartości prędkości kątowej.

Wyznaczenie charakterystyki prędkościowej tą drogą również zakończyło się powodzeniem i stworzono cztery charakterystyki – dla każdego z biegów. Przykładowy przebieg prędkości kątowej w czasie oraz charakterystyka prędkościowa momentu obrotowego wyznaczone w ten sposób zostały przedstawione na rysunkach 4.5. oraz 4.6.



Rys. 4.5. Przebieg prędkości kątowej wału korbowego silnika ( $\omega$ ) w czasie ( $t$ ) wyznaczony za pomocą pomiarów z hamulca hamowni.



Rys. 4.6. Charakterystyka prędkościowa momentu obrotowego silnika ( $M$  – moment obrotowy,  $n$  – prędkość obrotowa) wyznaczona za pomocą pomiarów z hamulca hamowni.

#### 4.4. Trudności z wykorzystaniem badań hamownianych do weryfikacji metody

Zgodnie z założeniami weryfikacji - charakterystyka prędkościowa wyznaczona za pomocą metody dźwiękowej miała być skonfrontowana z charakterystykami powstałymi w wyniku badań hamownianych. Niestety było to dość trudne do osiągnięcia, ponieważ nie zaszła zgodność między wynikami pomiarów z poszczególnych urządzeń pomiarowych na stanowisku hamownianym.

Wystąpiły niekiedy znaczące różnice między przebiegami zarówno prędkości obrotowej, jak i momentu obrotowego w czasie. Wartości maksymalne momentu obrotowego w większości wypadków były jednakowe, ale jest to oczywiste, biorąc pod uwagę sposób ich wyznaczania (była to wartość, na podstawie której identyfikowano pewne parametry). Jednak rozbieżności dotyczą charakteru przebiegu. Różnice te są największe dla badań wykonanych na pierwszym biegu, nieco mniejsze dla biegów: drugiego i czwartego, a najmniejsze dla biegu trzeciego.

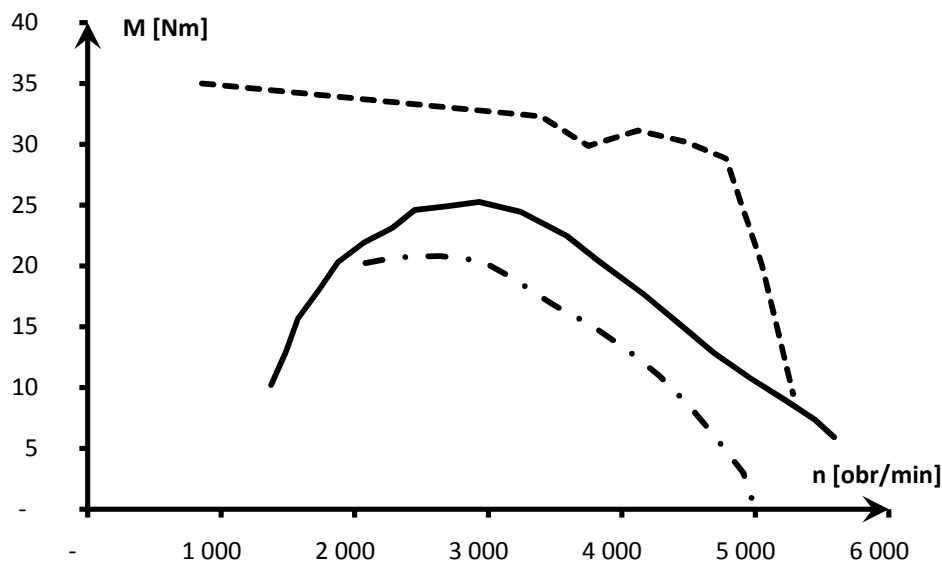
Przypuszcza się, że te rozbieżności są skutkiem poślizgów przy współpracy kół napędowych samochodu z rolkami hamowni. Owe poślizgi powinny zwiększać się w znacznym stopniu wraz ze wzrostem przyspieszenia kątownego kół oraz w nieco mniejszym stopniu wraz ze wzrostem prędkości kątownej kół. To tłumaczyłoby, dlaczego rozbieżności są najmniejsze dla badań wykonanych na trzecim biegu, ponieważ wówczas występują stosunkowo małe przyspieszenia przy niezbyt dużej prędkości.

Oprócz tych różnic zaobserwowano ponadto jeszcze jedną, szczególną różnicę. We wszystkich badaniach wartości momentu obrotowego wyznaczonego za pomocą pomiarów z hamulca są przesunięte w czasie względem pozostałych przebiegów. Również przebieg prędkości kątownej wyznaczonej za pomocą pomiarów z hamulca jest przesunięty w czasie względem pozostałych przebiegów prędkości.

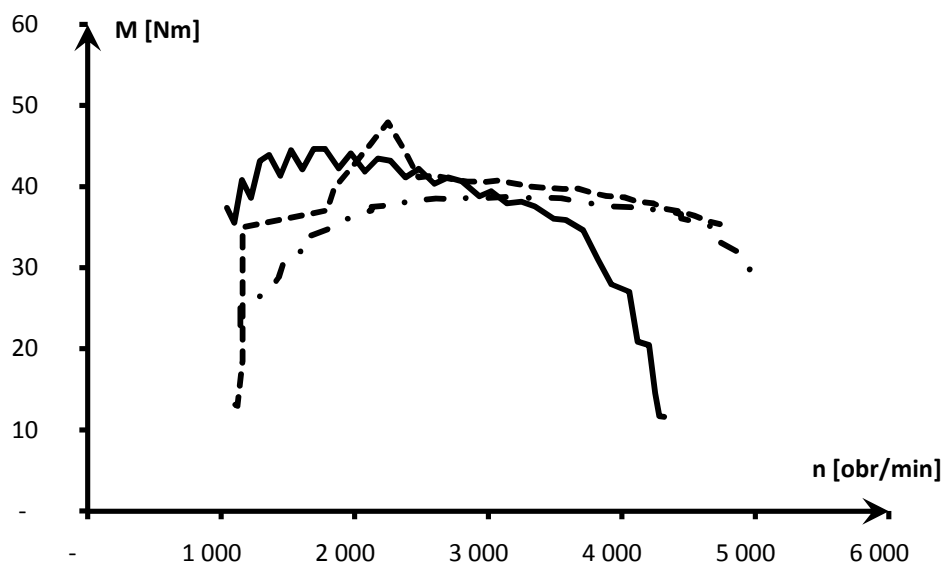
Można by przypuszczać, że działanie elementów pomiarowych w hamulcu jest opóźnione względem pozostałych przyrządów pomiarowych.

Postanowiono jednak nanieść charakterystyki prędkościowe wyznaczone metodą dźwiękową na pozostałe charakterystyki dla wszystkich biegów i zaobserwować, jakie występują podobieństwa i różnice do poszczególnych kształtów. Należy jednak zaznaczyć, że najważniejszym kryterium weryfikacyjnym badanej metody powinno być podobieństwo charakterystyki wyznaczonej na trzecim biegu, na którym występują najmniejsze rozbieżności wyników między poszczególnymi przyrządami pomiarowymi hamowni.

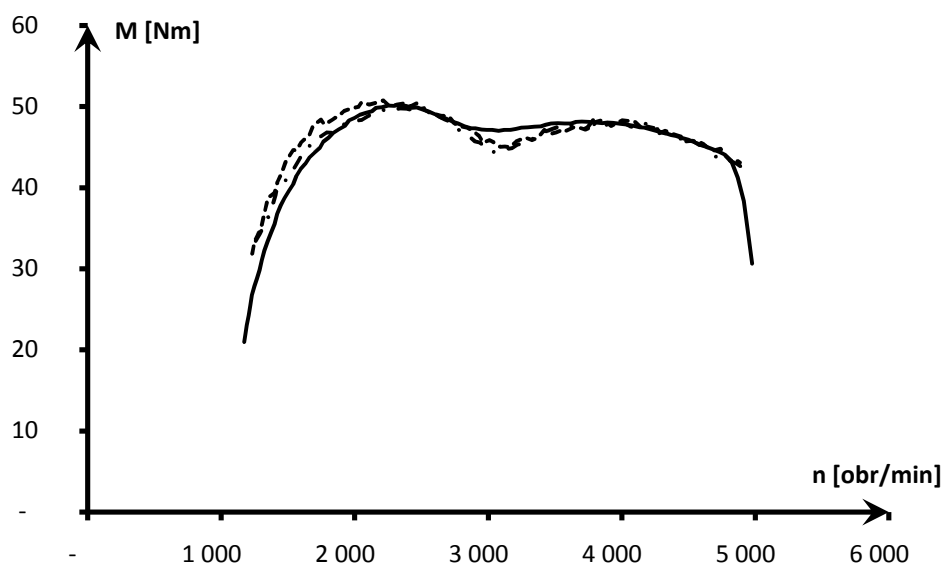
Na rysunkach 4.7., 4.8., 4.9. i 4.10. przedstawiono zestawienie (odpowiednio dla pierwszego, drugiego, trzeciego i czwartego biegu) charakterystyk prędkościowych momentu obrotowego wyznaczonych za pomocą wszystkich trzech metod hamownianych.



**Rys. 4.7.** Charakterystyki prędkościowe momentu obrotowego silnika ( $M$  – moment obrotowy,  $n$  – prędkość obrotowa) wyznaczone przy jeździe na pierwszym biegu różnymi metodami: linia kreskowa – za pomocą pomiarów z czujnika indukcyjnego, linia kropkowa – za pomocą pomiarów z czujnika prędkości rolek hamowni, linia ciągła – za pomocą pomiarów z hamulca hamowni.

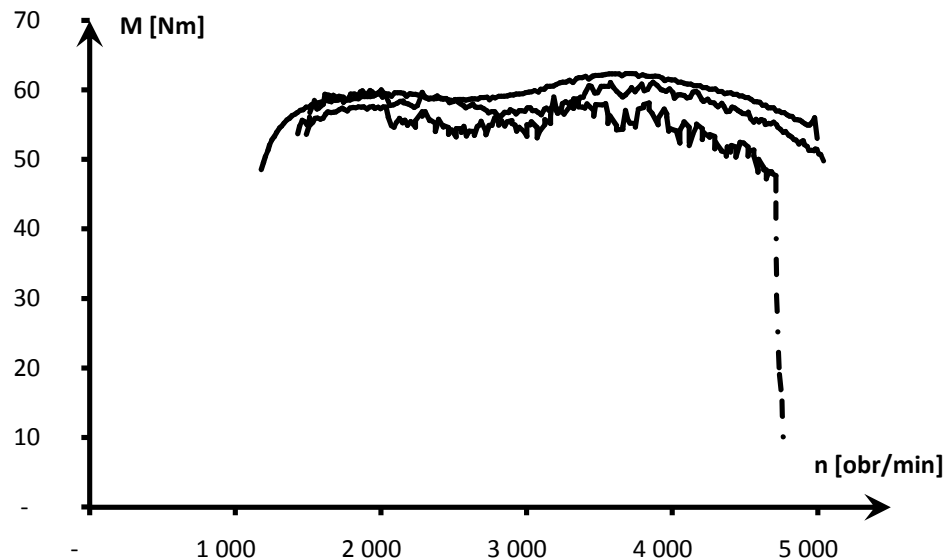


Rys. 4.8. Charakterystyki prędkościowe momentu obrotowego silnika ( $M$  – moment obrotowy,  $n$  – prędkość obrotowa) wyznaczone przy jeździe na drugim biegu różnymi metodami: linia kreskowa – za pomocą pomiarów z czujnika indukcyjnego, linia kropkowa – za pomocą pomiarów z czujnika prędkości rolek hamowni, linia ciągła – za pomocą pomiarów z hamulca hamowni.



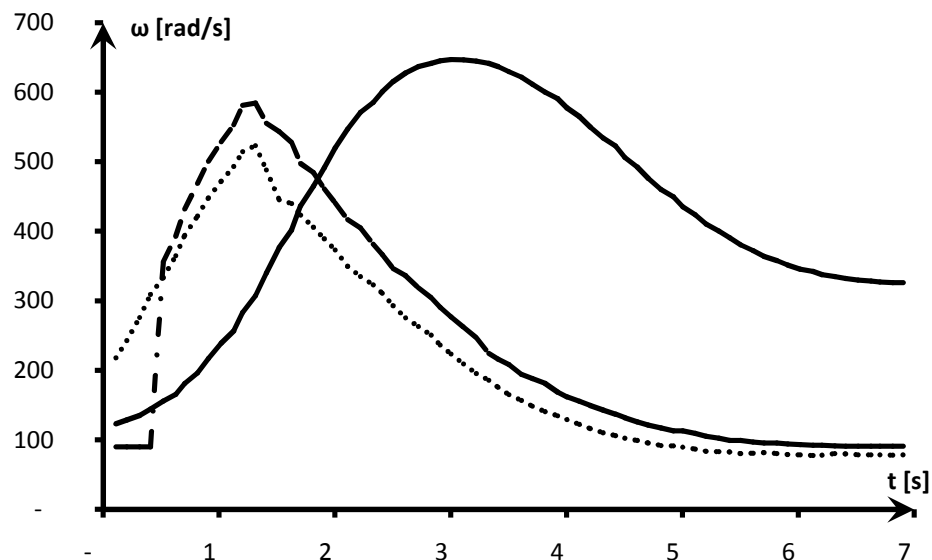
Rys. 4.9. Charakterystyki prędkościowe momentu obrotowego silnika ( $M$  – moment obrotowy,  $n$  – prędkość obrotowa) wyznaczone przy jeździe na trzecim biegu różnymi metodami: linia kreskowa – za pomocą pomiarów z czujnika indukcyjnego, linia kropkowa – za pomocą pomiarów z czujnika prędkości rolek hamowni, linia ciągła – za pomocą pomiarów z hamulca hamowni.



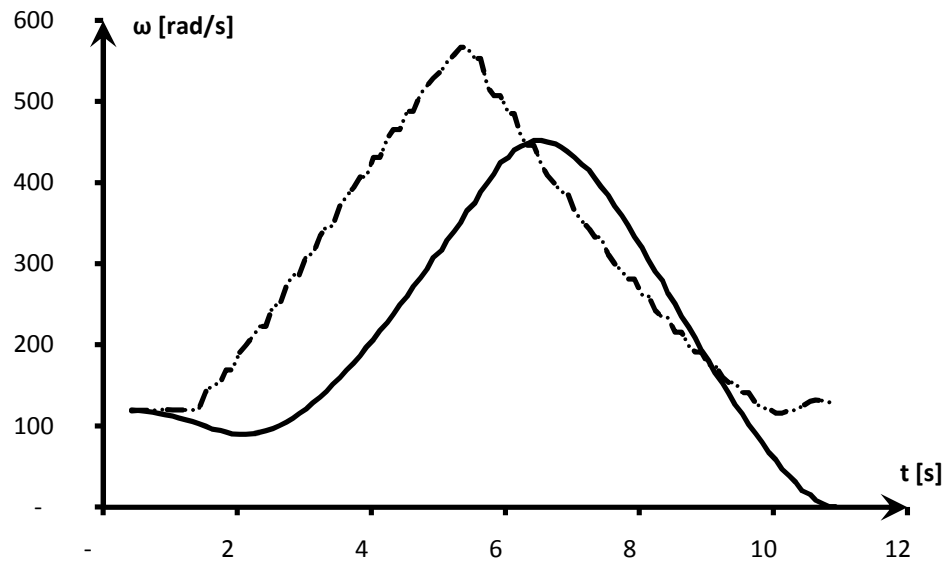


Rys. 4.10. Charakterystyki prędkościowe momentu obrotowego silnika ( $M$  – moment obrotowy,  $n$  - prędkość obrotowa) wyznaczone przy jeździe na czwartym biegu różnymi metodami: linia kreskowa – za pomocą pomiarów z czujnika indukcyjnego, linia kropkowa – za pomocą pomiarów z czujnika prędkości rolek hamowni, linia ciągła – za pomocą pomiarów z hamulca hamowni.

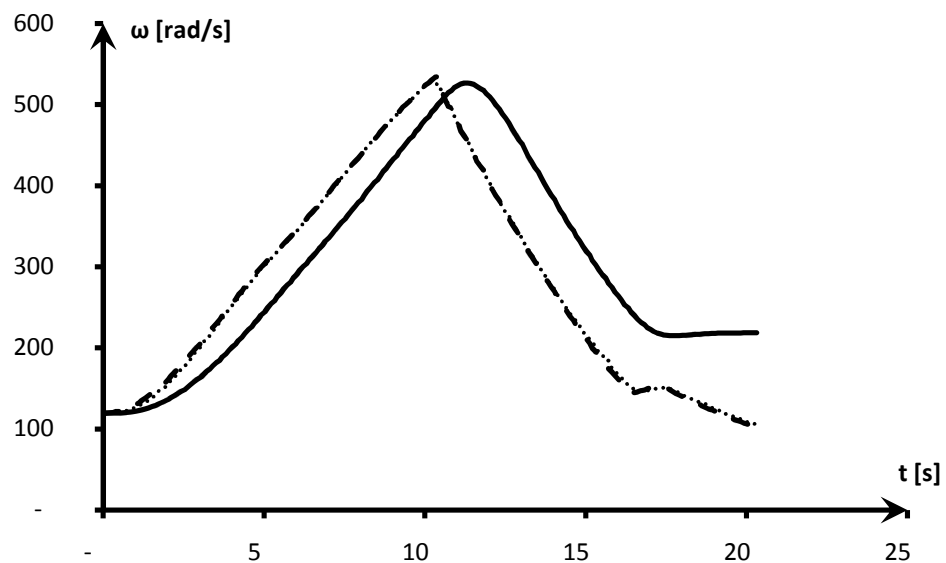
Na rysunkach 4.11., 4.12., 4.13. i 4.14. przedstawiono natomiast zestawienie (odpowiednio dla pierwszego, drugiego, trzeciego i czwartego biegu) przebiegi prędkości obrotowej wyznaczonych za pomocą wszystkich trzech metod hamownianych.



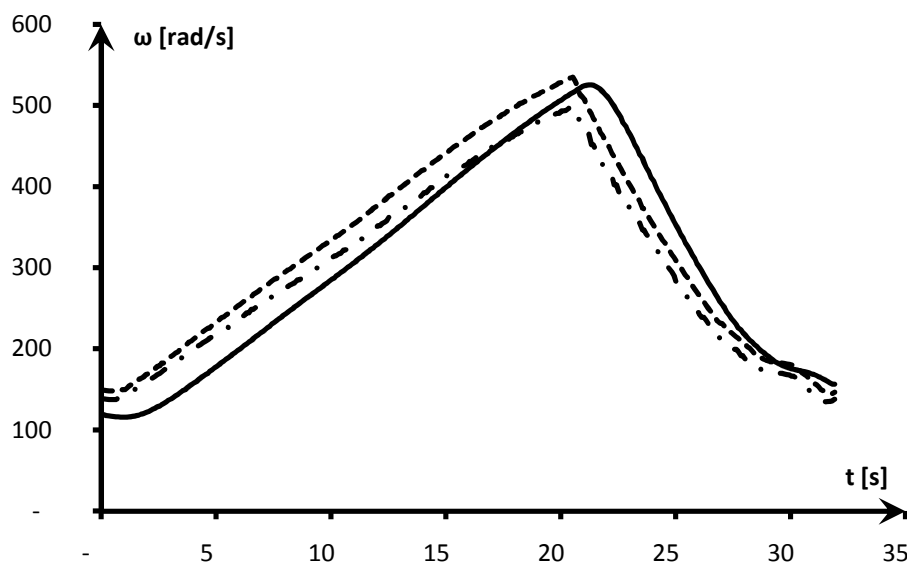
Rys. 4.11. Przebiegi prędkości kątowych wału korbowego silnika ( $\omega$ ) w czasie ( $t$ ) wyznaczone przy jeździe na pierwszym biegu różnymi metodami: linia kropkowa – za pomocą pomiarów z czujnika indukcyjnego, linia punktowa – za pomocą pomiarów z czujnika prędkości rolek hamowni, linia ciągła – za pomocą pomiarów z hamulca hamowni.



Rys. 4.12. Przebiegi prędkości kątowych wału korbowego silnika ( $\omega$ ) w czasie ( $t$ ) wyznaczone przy jeździe na drugim biegu różnymi metodami: linia kreskowa oraz kropkowa (prawie pokrywające się na wykresie) – za pomocą pomiarów z czujnika indukcyjnego oraz z czujnika prędkości rolek hamowni, linia ciągła – za pomocą pomiarów z hamulca hamowni.



Rys. 4.13. Przebiegi prędkości kątowych wału korbowego silnika ( $\omega$ ) w czasie ( $t$ ) wyznaczone przy jeździe na trzecim biegu różnymi metodami: linia kreskowa oraz kropkowa (prawie pokrywające się na wykresie) – za pomocą pomiarów z czujnika indukcyjnego oraz z czujnika prędkości rolek hamowni, linia ciągła – za pomocą pomiarów z hamulca hamowni.



Rys. 4.14. Przebiegi prędkości kątowych wału korbowego silnika ( $\omega$ ) w czasie ( $t$ ) wyznaczone przy jeździe na czwartym biegu różnymi metodami: linia kreskowa – za pomocą pomiarów z czujnika indukcyjnego, linia kropkowa – za pomocą pomiarów z czujnika prędkości rolek hamowni, linia ciągła – za pomocą pomiarów z hamulca hamowni.

#### 4.5. Wyznaczenie charakterystyki metodą dźwiękową

Wyznaczanie charakterystyki prędkościowej metodą dźwiękową odbywało się według algorytmu przedstawionego w podrozdziale 3.7.

Należy jednak zaznaczyć, że problem wyznaczenia opisanych tam: sumy momentów bezwładności  $I$  oraz sumy momentów obrotowych oporów ruchu  $M_0$  został rozwiązany w identyczny sposób, jak w podrozdziale 4.3. Został tutaj zastosowany nie tylko ten sam sposób postępowania, ale również te same wartości współczynników, ponieważ wyniki pomiaru sygnału dźwiękowego dotyczyły tego samego badania, a więc i takich samych warunków wpływających na opór ruchu oraz bezwładność.

#### 4.6. Porównanie metody dźwiękowej z wynikami badań hamownianych i interpretacja wyników

Należy zauważyć, że wobec istniejących rozbieżności w wynikach z pomiarów wykonanych na stanowisku hamownianym, prezentowana metoda daje zadowalające rezultaty.

Trudno jest wyróżnić spośród metod hamownianych jedną, najbardziej wiarygodną, aby właśnie z nią porównywać weryfikowaną metodę, ponieważ żadna z nich nie wydaje się być obciążona mniejszymi błędami pomiarowymi lub obliczeniowymi, niż pozostałe. Nie można w związku z tym zdefiniować miarodajnego wskaźnika wyrażającego w sposób oczywisty wartość błędów wykrywanych w charakterystyce pochodzącej z nowej metody (takiego, jak na przykład średniokwadratowa wartość błędu względnego). Dlatego też celowe jest porównywanie rezultatów metody dźwiękowej z rezultatami wszystkich pozostałych metod jednocześnie – najlepiej w sposób wizualny.

Z pozoru może dziwić fakt dość małych wartości momentu obrotowego osiąganego przez silnik. Przypuszcza się jednak, że nie jest to wynikiem błędnie wykonanych obliczeń,

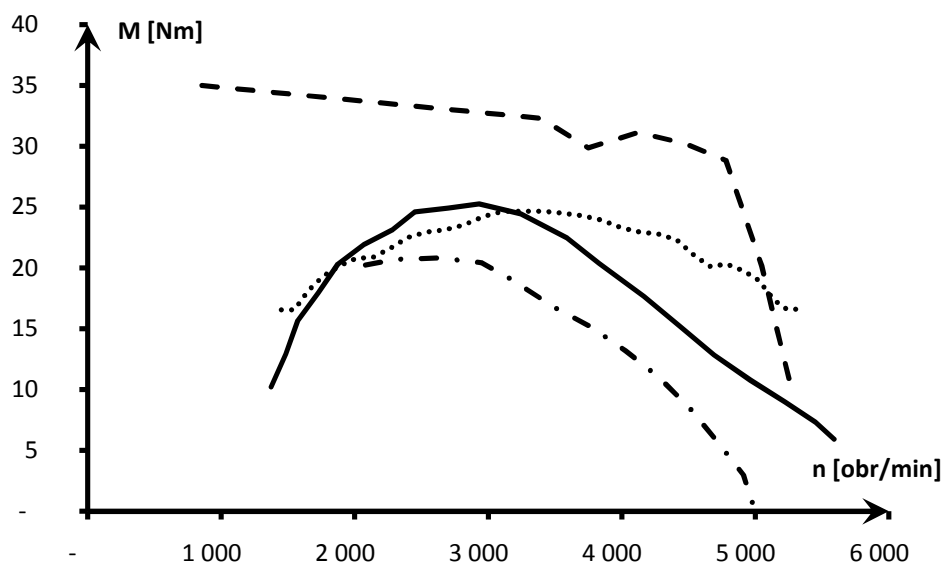
ale faktycznie takim momentem obrotowym mógł dysponować badany silnik. Trzeba wziąć pod uwagę, że samochód był zasilany paliwem LPG (co może powodować spadek momentu obrotowego silnika), a jego stan techniczny był bardzo niekorzystny. Dodatkowo pracował on w dynamicznych warunkach pracy, które w znacznym stopniu mogą pogarszać jakość pracy silnika (więcej na ten temat zostanie powiedziane w rozdziale 5. - wykorzystanie metody, a specyfika pracy silnika przy różnych obciążeniach zewnętrznych). W związku z powyższym przyjmowane wartości charakterystyki prędkościowej nie powinny być powodem do niepokoju.

Należy zauważyć, że wartości charakterystyki prędkościowej prezentowanej metody zawierają się zwykle między wartościami pozostałych charakterystyk. Jest to dobrą oznaką, świadczącą o tym, że nowa metoda daje rezultaty nie gorsze niż dotychczasowe metody badania za pomocą hamowni podwoziowej.

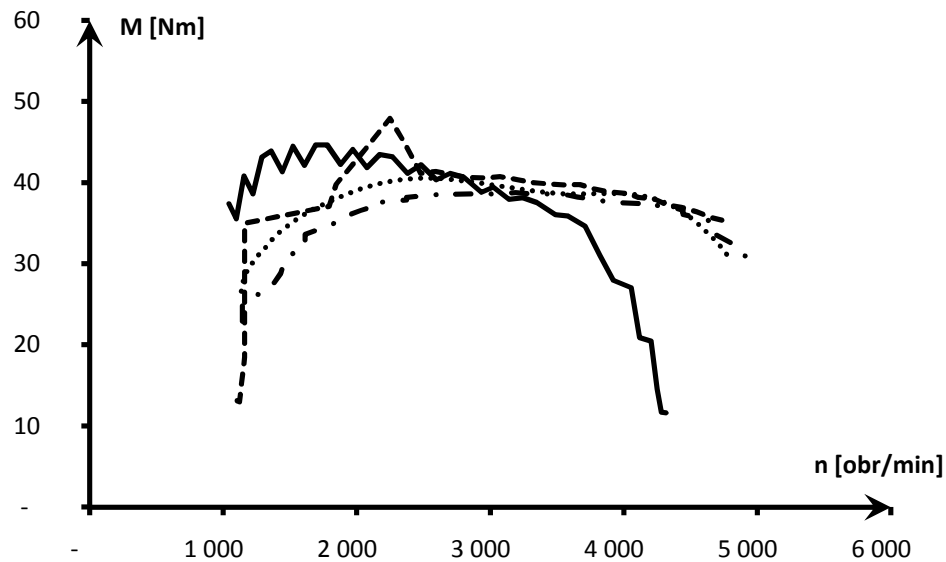
Również charakter (kształt) funkcji momentu obrotowego jest zgodny z pozostałymi kształtami. To znaczy, że nie odbiega on od pozostałych kształtów w stopniu większym, niż pozostałe charakterystyki odbiegają od siebie nawzajem.

Zgodność kształtów charakterystyk prędkościowych - wyznaczonych za pomocą przyrządów stanowiska hamownianego oraz za pomocą prezentowanej metody dźwiękowej jest największa dla próby wykonanej na biegu trzecim, która została uznana (w poprzednim podrozdziale) za najbardziej miarodajną i najbardziej przydatną do weryfikacji poprawności prezentowanej metody.

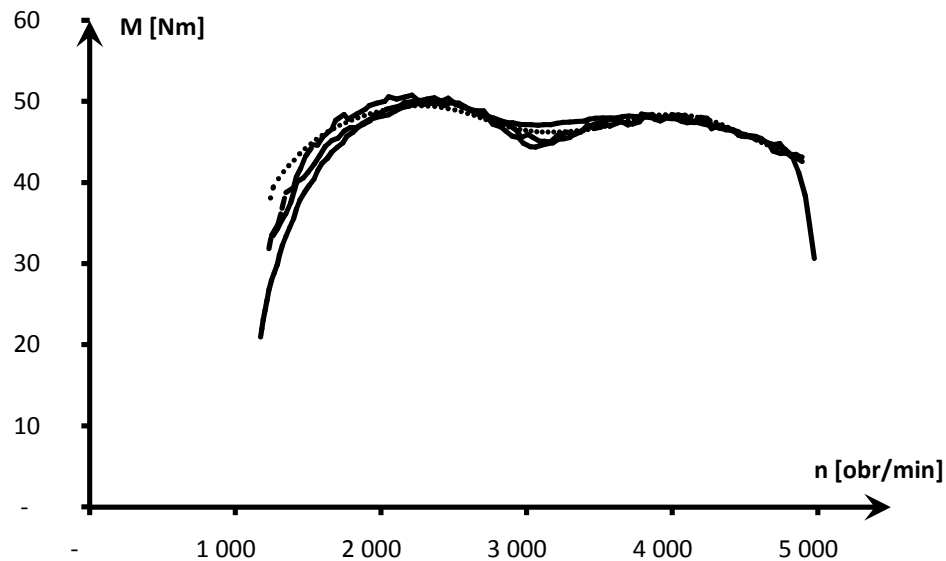
Na rysunkach 4.15., 4.16., 4.17. i 4.18. przedstawiono zestawienie (odpowiednio dla pierwszego, drugiego, trzeciego i czwartego biegu) charakterystyk prędkościowych momentu obrotowego wyznaczonych za pomocą wszystkich trzech metod hamownianych oraz za pomocą prezentowanej metody dźwiękowej.



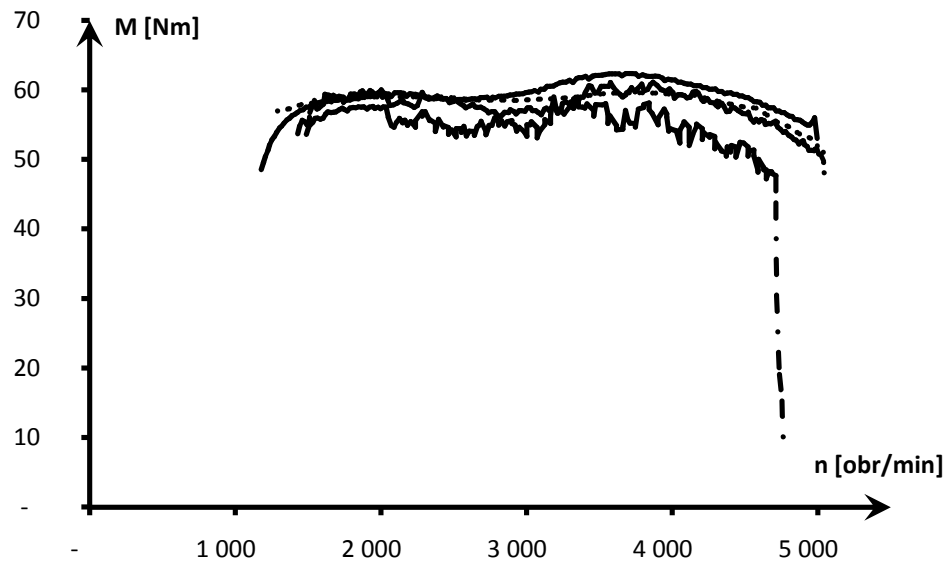
Rys. 4.15. Charakterystyki prędkościowe momentu obrotowego silnika (M – moment obrotowy, n - prędkość obrotowa) wyznaczone przy jeździe na pierwszym biegu różnymi metodami: linia kreskowa – za pomocą pomiarów z czujnika indukcyjnego, linia kropkowa – za pomocą pomiarów z czujnika prędkości rolek hamowni, linia ciągła – za pomocą pomiarów z hamulca hamowni, linia punktowa – za pomocą metody dźwiękowej.



Rys. 4.16. Charakterystyki prędkościowe momentu obrotowego silnika ( $M$  – moment obrotowy,  $n$  – prędkość obrotowa) wyznaczone przy jeździe na drugim biegu różnymi metodami: linia kreskowa – za pomocą pomiarów z czujnika indukcyjnego, linia kropkowa – za pomocą pomiarów z czujnika prędkości rolek hamowni, linia ciągła – za pomocą pomiarów z hamulca hamowni, linia punktowa – za pomocą metody dźwiękowej.



Rys. 4.17. Charakterystyki prędkościowe momentu obrotowego silnika ( $M$  – moment obrotowy,  $n$  – prędkość obrotowa) wyznaczone przy jeździe na trzecim biegu różnymi metodami: linia kreskowa – za pomocą pomiarów z czujnika indukcyjnego, linia kropkowa – za pomocą pomiarów z czujnika prędkości rolek hamowni, linia ciągła – za pomocą pomiarów z hamulca hamowni, linia punktowa – za pomocą metody dźwiękowej.



Rys. 4.18. Charakterystyki prędkościowe momentu obrotowego silnika ( $M$  – moment obrotowy,  $n$  - prędkość obrotowa) wyznaczone przy jeździe na czwartym biegu różnymi metodami: linia kreskowa – za pomocą pomiarów z czujnika indukcyjnego, linia kropkowa – za pomocą pomiarów z czujnika prędkości rolek hamowni, linia ciągła – za pomocą pomiarów z hamulca hamowni, linia punktowa – za pomocą metody dźwiękowej.

## **5. Wykorzystanie metody a specyfika pracy silnika przy różnych obciążeniach zewnętrznych**

### **5.1. Stopień dynamiczności pracy silnika przy różnych obciążeniach zewnętrznych**

Podstawy teoretyczne różnego zachowania się silnika przy różnych obciążeniach zewnętrznych zostały przedstawione w podrozdziale 3.4. - Specyfika pracy silnika podczas badań. Stwierdzono tam, że moment obrotowy generowany przez silnik na jego wale korbowym może być różny w zależności od stopnia dynamiczności pracy silnika, którego miarą jest przyspieszenie kątowne wału korbowego  $\varepsilon$ . Zależy on od obciążenia zewnętrznego silnika w taki sposób, że dla dużych wartości oporów zewnętrznych przyspieszenie  $\varepsilon$  jest małe, a dla niewielkich oporów – duże.

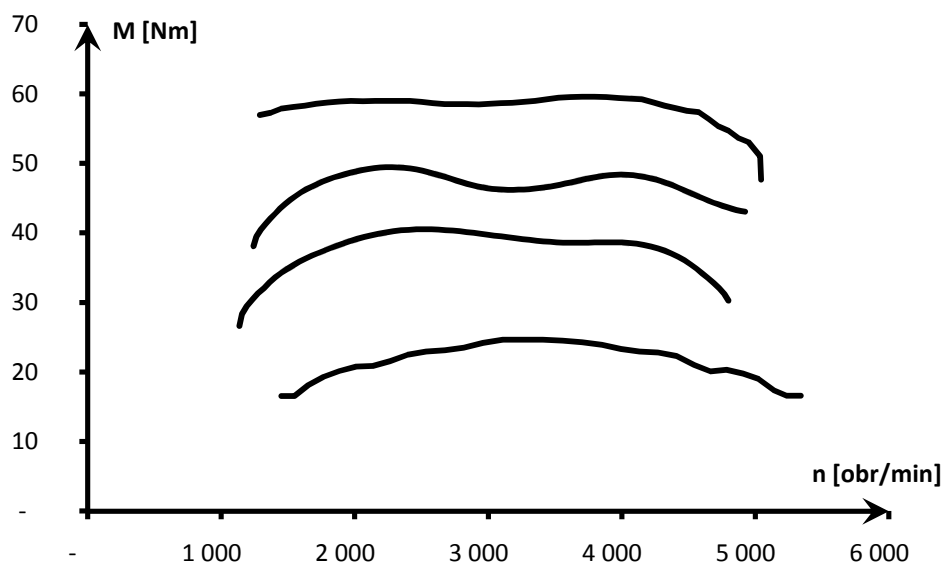
W następnym podrozdziale przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań (kontrolnych – z poprzedniego rozdziału), z których można wyciągnąć wnioski dotyczące podanego zjawiska. Jest ono bowiem dość istotne przy stosowaniu metody dźwiękowej do wyznaczania charakterystyki prędkościowej.

### **5.2. Wpływ stopnia dynamiczności na przebieg charakterystyki prędkościowej**

Z przeprowadzonych badań wynika, że wpływ stopnia dynamiczności na wartości przyjmowane przez moment obrotowy może być bardzo duży.

Dla badań wykonanych na 4 biegu wartość maksymalnego momentu obrotowego wynosi 60 N·m, a dla biegu 1 zaledwie 25 N·m. Jest to różnica 2,4-krotna. Różnice w wartościach momentu obrotowego osiąganego na poszczególnych biegach zostały pokazane na rysunku 4.19. Należy się spodziewać, że dla badań wykonanych w statycznych warunkach pracy silnika wartość maksymalna momentu obrotowego tego silnika mogłaby wynosić nawet 80 N·m lub więcej.

W obliczeniach trakcyjnych zwykle przyjmuje się, że wartość osiąganego momentu obrotowego przy dynamicznych warunkach pracy silnika spada o 2% w stosunku do momentu osiąganego w warunkach pracy statycznej. W obliczu przedstawionych wyników wydaje się to zdecydowanie zbyt dużym przybliżeniem. Dla pierwszego biegu wartości momentu obrotowego mogą bowiem spadać nawet o 80%.



Rys. 4.19. Charakterystyki prędkościowe momentu obrotowego silnika ( $M$  – moment obrotowy,  $n$  – prędkość obrotowa) przy jeździe na poszczególnych biegach (licząc od najniższej funkcji w kierunku najwyższej – na pierwszym, drugim, trzecim i czwartym biegu).

Przedstawione wyniki badań nie są wystarczające do wyznaczenia jasnej zależności między stopniem dynamiczności pracy silnika, a maksymalnym momentem obrotowym, ponieważ przeprowadzono jedynie kilka pomiarów dla jednego silnika. Nie wiadomo też, czy przedstawiane zjawisko zawsze jest tak silnie zauważalne. Można przypuszczać, że w wypadku badanego silnika było ono spotęgowane jego niekorzystnym stanem technicznym. Nie jest też celem tej pracy szczegółowe wyznaczanie takich funkcji.

Należy jednak wyraźnie stwierdzić, że zjawisko spadku momentu obrotowego w dynamicznych warunkach pracy silnika istnieje i może być bardzo silne. Wniosek ten dotyczy dynamicznych warunków pracy silnika w czasie jego przyspieszania. Pomoże to ustrzec się od popełniania błędów przy wyznaczaniu charakterystyki prędkościowej metodą dźwiękową (lub innymi metodami).

### 5.3. Niebezpieczeństwo błędnego wykorzystania metody

Aby prawidłowo wyznaczyć charakterystykę prędkościową należy przeprowadzić badania w warunkach pracy najbardziej zbliżonych do sytuacji, w której wyznaczana charakterystyka będzie wykorzystywana. W przeciwnym wypadku istnieje niebezpieczeństwo stworzenia charakterystyki prędkościowej nieprzydatnej do założonych celów.

Błędem byłoby na przykład przeprowadzenie badań na silniku pracującym w skrajnie dynamicznych warunkach pracy (jakie występują w trakcie maksymalnego przyspieszania na pierwszym biegu), a następnie założenie, że wyznaczona w ten sposób charakterystyka prędkościowa będzie taka sama w dowolnych innych warunkach i zastosowanie jej do obliczeń trakcyjnych przyspieszania samochodu na biegu czwartym.

Należy się spodziewać, że podobnym błędem jest często wykorzystywany sposób postępowania, polegający na stworzeniu charakterystyki prędkościowej w warunkach statycznych pracy silnika, a następnie zastosowanie jej do obliczeń trakcyjnych przyspieszania samochodu na wszystkich biegach, a więc dla kilku bardzo różnych stopni dynamiczności pracy silnika.



W wypadku braku informacji na temat zależności między kształtem charakterystyki, a stopniem dynamiczności pracy silnika należy wyznaczyć więcej charakterystyk prędkościowych, odpowiadających różnym stanom pracy silnika – na przykład dla przyspieszania na wszystkich biegach – oddzielnie.

Ponadto nie należy kojarzyć warunków pracy silnika jedynie ze stopniem dynamiczności jego pracy. Istotny wpływ może mieć o wiele więcej czynników, jak chociażby działanie urządzenia sterującego pracą silnika – na przykład szybkość zmiany ustawienia pedału przyspieszenia. Wszystkie te czynniki należy wziąć pod uwagę przy wyznaczaniu charakterystyki prędkościowej.

#### **5.4. Inne zastosowania metody**

Możliwe jest również wyznaczenie charakterystyki prędkościowej przy niepełnym obciążeniu silnika. W tym celu można w trakcie przeprowadzania badania ustawić urządzenie sterujące obciążeniem silnika (na przykład pedał przyspieszenia) zamiast w pozycji maksymalnej – w dowolnej innej pozycji. W efekcie zostanie wyznaczona charakterystyka prędkościowa częściowa – również przydatna w wielu sytuacjach.

Takie próby nie zostały przeprowadzone w prezentowanej pracy ze względu na trudność w określeniu stopnia obciążenia silnika w takiej sytuacji. Nie było to też bezpośrednim celem pracy.

## 6. Możliwości dalszego rozwoju metody

Przewiduje się oczywiście możliwość dalszego rozwoju metody. Kierunki rozwojowe mogą mieć trojaki charakter, z których każdy zostanie omówiony oddzielnie w podrozdziałach: 6.1., 6.2. oraz 6.3.

### 6.1. Rozwój koncepcyjny

Rozwój koncepcyjny metody może polegać na próbach określania innych wielkości opisujących stan pracy silnika, niż prędkość obrotowa jego wału korbowego bezpośrednio na podstawie przebiegu sygnału dźwiękowego silnika. Może do nich należeć na przykład stopień obciążenia silnika.

Na podstawie dotychczasowej lub zmodyfikowanej analizy sygnału dźwiękowego można także podjąć próby wykrywania zjawiska wypadania zapłonów lub innych zjawisk pozwalających na diagnozowanie silnika.

### 6.2. Rozwój algorytmu matematycznego

Przy dotychczasowym zastosowaniu sygnału dźwiękowego jakiegokolwiek modyfikacje algorytmu obliczeń mające na celu zwiększenie dokładności obliczeń nie wydają się celowe. Jednak w przyszłości można by dodać do istniejącego programu „przyjazny” interfejs, umożliwiający łatwą komunikację między programem a użytkownikiem. Do celów zaprezentowania algorytmu obliczeń w pracy został stworzony program wykorzystujący do komunikacji interfejs edytora języka programowania Matlab 5.3. W związku z tym dokonywanie zmian w parametrach sterujących działaniem algorytmu sprowadza się do zmian w programie.

### 6.3. Rozwój sprzętowy

Jakiegokolwiek zmiany przyrządu potrzebnego do wykonania badania (dyktafonu cyfrowego) prowadzące do znacznego powiększenia kosztów badania są sprzeczne z założeniami prezentowanej metody. Jej głównym założeniem jest bowiem możliwie jak największe obniżenie kosztów badania. Jednak można spróbować zastąpić pomiar ciśnienia akustycznego pomiarem drgań wybranego punktu kadłuba silnika za pomocą czujnika drgań (o ile jego koszt byłby porównywalny z ceną dyktafonu cyfrowego).

Ciekawe rezultaty mógłby także przynieść pomiar ciśnienia akustycznego w wybranym punkcie w okolicy wylotu spalin z rury wydechowej samochodu.

## 7. Podsumowanie

### 7.1. Możliwe zastosowania metody

Za pomocą prezentowanej metody możliwe jest wyznaczanie charakterystyki prędkościowej służącej jako:

- podstawa do obliczeń trakcyjnych pojazdów,
- wskaźnik porównawczy parametrów pracy silnika i jego przydatności do określonych zadań,
- podstawa do diagnostyki stanu technicznego silnika.

Charakterystyki te mogą być przeprowadzane podczas pracy silnika w bardzo różnych stanach, charakteryzowanych przez stopień dynamiczności pracy, obciążenie silnika, sposób zmiany urządzeń sterujących pracą silnika i tym podobne.

### 7.2. Ocena przydatności metody

Każda metoda wyznaczania charakterystyki prędkościowej silnika lub też innych parametrów pracy silnika związana jest z pewnymi wadami. Każda z nich posiada niewątpliwie również zalety. W podrozdziałach 6.1. oraz 6.2. przedstawiono kilka najistotniejszych cech, jakimi charakteryzuje się prezentowana metoda dźwiękowa.

#### 7.2.1. Zalety metody

Zaletami zaproponowanej metody wyznaczania charakterystyki prędkościowej są:

- dokładność wyznaczanych wartości charakterystyki prędkościowej jest porównywalna z dokładnością osiąganą na stanowisku hamowni podwoziowej (nie konfrontowano metody z dokładnością osiąganą na hamowni silnikowej);
- możliwość wyznaczania charakterystyki prędkościowej w bardzo różnych stanach pracy silnika (przy różnym obciążeniu, stopniu dynamiczności pracy, sposobie sterowania i tym podobnych);
- badanie jest proste do zrealizowania, nie wymaga dojeżdżania badanym samochodem do specjalnych stanowisk badawczych;
- bardzo niski koszt wykonania badania oraz potrzebnych przyrządów;
- metoda nadaje się do dalszego rozwoju i daje nadzieję na możliwość jej szerszego zastosowania.

#### 7.2.2. Wady metody

Na podstawie zrealizowanej pracy można opisać następujące wady zaproponowanej metody wyznaczania charakterystyki prędkościowej silnika:

- wrażliwość na wszelkiego rodzaju zakłócenia dźwiękowe pochodzące z zewnątrz (spoza silnika), jak również z wewnątrz (będące częścią emitowanego sygnału przez silnik);

- konieczność przeprowadzenia badania w możliwie jak najcichszym miejscu (w związku z poprzednim punktem);
- konieczność przeprowadzenia badania w trakcie zmiany prędkości obrotowej wału korbowego silnika, przez co nie jest możliwe wyznaczenie charakterystyki prędkościowej w warunkach stacjonarnych pracy silnika;
- konieczność wykonania skomplikowanych obliczeń za pomocą komputera;
- możliwość wyznaczenia jedynie charakterystyki prędkościowej momentu obrotowego i mocy – bez określania takich wielkości, jak zużycie paliwa, temperatura spalin, czy stopień zadymienia spalin.

### **7.3. Uwagi i wnioski końcowe**

Na podstawie przeprowadzonych rozważań oraz zrealizowanej pracy można sformułować następujące wnioski:

- charakterystyka prędkościowa jest cennym, powszechnie wykorzystywanym wskaźnikiem parametrów pracy silnika;
- standardowe metody wyznaczania charakterystyki prędkościowej mogą okazać się w niektórych wypadkach zbyt skomplikowane lub zbyt kosztowne;
- istnieje potrzeba poszukiwania nowych, lepszych metod wyznaczania charakterystyki prędkościowej;
- w prezentowanej pracy stworzono nową metodę wyznaczania charakterystyki prędkościowej polegającą na analizie sygnału dźwiękowego emitowanego przez silnik w trakcie jego pracy;
- metoda ta została zweryfikowana za pomocą badań hamownianych i oceniona pozytywnie pod względem poprawności podawanych wyników;
- podczas wyznaczania charakterystyki prędkościowej (również nową metodą) należy zwrócić szczególną uwagę na specyfikę pracy silnika w różnych warunkach;
- istnieją możliwości dalszego rozwoju prezentowanej metody;
- metoda dźwiękowa posiada szereg cech, pozwalających na wykorzystanie jej w praktyce podczas prowadzonych badań.

### **7.4. Odniesienie do celu pracy**

Została stworzona nowa metoda, którą można wykorzystać do wyznaczania charakterystyki prędkościowej momentu obrotowego i mocy silnika. Zgodnie z założeniami - wykorzystuje ona sygnał dźwiękowy emitowany przez silnik w trakcie jego pracy i dokonuje jego analizy. Ponadto spełnione zostały wszystkie cztery warunki, jakie powinna spełnić prezentowana metoda, określone w podrozdziale 1.2. - Cel pracy.

Wobec tego należy dojść do wniosku, że cel pracy został spełniony.

## 8. Bibliografia

- [1] Arczyński Stanisław: Mechanika ruchu samochodu WNT, Warszawa 1993
- [2] Mitschke Manfred: Teoria Samochodu. Dynamika samochodu. Napęd i hamowanie, Tom 1, WKŁ, Warszawa 1987
- [3] Jaśkiewicz Zbigniew: Projektowanie układów napędowych pojazdów samochodowych, WKŁ, Warszawa 1982
- [4] Lanzendoerfer J., Szczepaniak C.: Teoria ruchu samochodu. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980.
- [5] Kruczyński Z., Michalak W.: Pracownia samochodowa. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1975.
- [6] Zieliński T.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2005.
- [7] Krupka J., Morawski R., Opalski L.: Wstęp do metod numerycznych dla studentów elektroniki i technik informatycznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [8] Szczepański Tomasz: Metoda wyznaczania charakterystyki prędkościowej momentu obrotowego silnika do samochodu osobowego, Praca dyplomowa inżynierska, prowadzący pracę: Stanisław Orzeszak, Instytut Pojazdów P.W., Warszawa 2005
- [9] PN-88/S-02005 Silniki samochodowe. Badania stanowiskowe. Podstawowe parametry pracy.
- [10] Piętaś A.: Wykłady ze Wstępu do Mechatroniki Samochodowej na wydziale SiMR PW w roku akademickim 2005/2006.

## Dodatek

Dodatek do pracy zawiera program komputerowy napisany w języku Matlab, przeznaczony do wyznaczania charakterystyki prędkościowej momentu obrotowego i mocy silnika spalinowego za pomocą analizy sygnału dźwiękowego.

Przedstawiony poniżej program jest wersją specjalną, przeznaczoną do wydrukowania w tekście pracy dyplomowej. Z tego powodu nie zawiera on żadnych oddzielnie istniejących skryptów, a wszystkie obliczenia przedstawione są w postaci ciągłej.

Sam tok obliczeń jest jednak identyczny z tokiem w programach, których używano do wykonania wszystkich obliczeń przedstawionych w prezentowanej pracy.

```
% Program do wyznaczania charakterystyki prędkościowej momentu obrotowego
% i mocy silnika spalinowego za pomocą analizy sygnału dźwiękowego

% Zwolnienie pamięci
clear all

% Wczytanie sygnału dźwiękowego i stworzenie wektora sygnału (s)
load sygnal;
s=sygnal';
clear sygnal

% Określenie częstotliwości próbkowania (fpr)
fpr=22050;

% Odczytanie długości sygnału s (n)
n=size(s,2);

% Normalizacja sygnału s
sr=0;
for i=1:n
    sr=sr+s(i)/n;
end
s=s-sr;
clear sr i

% Standaryzacja sygnału s
os=0;
for i=1:n
    os=os+(s(i)^2)/n;
end
os=sqrt(os);
s=s/os;
clear os i

% Stworzenie dziedziny przebiegu sygnału - wektora czasu (ts)
dt=1/fpr;
ts=dt*(0:n-1);
clear dt

% Wyznaczenie długości okna czasowego wstępnego badania sygnału s (mp)
mp=floor(n/8);
```

```

% Podział sygnału (s) na odcinki o długości (ilości próbek) mp
kp=8;
Mp=zeros(kp,mp);
for i=1:kp
    Mp(i,:)=s(1+(i-1)*mp:i*mp);
    tMp(i)=ts(1+(i-1)*mp);
end
clear i

% Normalizacja macierzy Mp
for j=1:kp
    sr=0;
    for i=1:mp
        sr=sr+Mp(j,i)/mp;
    end
    Mp(j,:)=Mp(j,:)-sr;
end
clear sr i j

% Wyznaczenie widma macierzy Mp (MFp)
MFp=zeros(kp,mp);
for i=1:kp
    MFp(i,:)=abs(fft(Mp(i,:)));
end
clear i

% Zerowanie prążka zerowego w widmie
MFp(:,1)=zeros(kp,1);

% Wyznaczenie wektora częstotliwości (Fp)
df=fpr/mp;
Fp=df*(0:mp-1);
clear df

% Określenie nowej długości badanych odcinków (mp1)
mp1=300;

% Odrzucenie nieinteresującej części macierzy widmowej
MFp=MFp(:,1:mp1);
Fp=Fp(1:mp1);

% Wyznaczenie maksymalnych wartości macierzy MFp (mxp)
mxp=zeros(1,kp);
for j=1:kp
    nw=0;
    for i=1:mp1
        if MFp(j,i)>nw
            nw=MFp(j,i);
            mxp(j)=i;
        end
    end
end
clear i j nw MFp mp1

% Odczytanie częstotliwości odpowiadających maksimum macierzy MFp (fxp)
for i=1:kp
    fxp(i)=Fp(mxp(i));
end
clear i Fp mxp

```

```

% Określenie stałych parametrów filtrowania (ds, str)
d=0.0001;
str=10;
fbes=12;

% Stworzenie czasowego okna parametrycznego (w)
A=-20*log10(d);
if (A>=50) beta=0.1102*(A-8.7); end
if (A>21 & A<50) beta=(0.5842*(A-21)^0.4)+0.07886*(A-21); end
if (A<21) beta=0; end
if (A>21) D=(A-7.95)/14.36; end
if (A<=21) D=0.922; end
fN=ceil((D*fpr/str)+1);
if(rem(fN,2)==0) fN=fN+1; end
fM=(fN-1)/2;
fm=1:fM;
fn=1:fN;
w=besseli(0,beta*sqrt(1-((fn-1)-fM).^2/fM^2))/besseli(0,beta);
clear A beta D fN fM fn d

% Filtrowanie macierzy Mp
for i=1:kp
    fd1=fxp(i)+fbes;
    fd2=fd1+str;
    fc=((fd1+fd2)/2)/fpr;
    wc=2*pi*fc;
    h=2*fc*sin(wc*fm)./(wc*fm);
    h=[fliplr(h) 2*fc h];
    hw=h.*w;
    zd=conv(Mp(i,:),hw);
    r=size(zd,2)-mp;
    r05=round(r/2);
    dzd=size(zd,2);
    Mp(i,:)=(zd(r05+1:dzd-r05));
end
clear i fd1 fd2 fc wc h zd r r05 dzd hw fm mp str w fbes

% Złożenie odfiltrowanego sygnału
skl=[];
for i=1:kp
    skl=[skl Mp(i,:)];
end
s=skl;
clear i skl Mp

% Wyznaczenie długości właściwego okna czasowego (m)
ssf=0;
sst=0;
for i=1:kp-1
    ssf=ssf+((fxp(i+1)-fxp(i))/kp)^2;
    sst=sst+((tMp(i+1)-tMp(i))/kp)^2;
end
wsp=round(ssf/sst);
m=round(sqrt(n*wsp));
clear i ssf sst tMp kp wsp

% Wyznaczenie stopnia zachodzenia na siebie okien (p)
p=m-round(0.3*m);

% Wyznaczenie ilości odcinków sygnału do badania (k)
k=floor((n-p)/(m-p));

```



```

% Podział sygnału s na odcinki - stworzenie macierzy (M) oraz wyznaczenie
dziedziny czasowej (t)
M=zeros(k,m);
for i=1:k
    M(i,:)=s(1+(i-1)*(m-p):i*(m-p)+p);
    t(i)=ts(1+(i-1)*(m-p));
end
clear i s ts n p

% Stworzenie okna czasowego Kaiser'a (w)
Asl=20;
if (Asl<=13.26) beta=0; end
if (13.26<Asl & Asl<=60) beta=0.76609*(Asl-13.26)^0.4+0.09834*(Asl-13.26);
end
if (60<Asl & Asl<=120) beta=0.12438*(Asl+6.3); end
w=kaiser(m,beta)';
w=w.*(sum(boxcar(size(w,1)))/sum(w));
clear Asl beta

% Przepuszczenie macierzy M przez okno czasowe w
for i=1:k
    M(i,:)=M(i,:).*w;
end
clear w

% Normalizacja macierzy M
for j=1:k
    sr=0;
    for i=1:m
        sr=sr+M(j,i)/m;
    end
    M(j,:)=M(j,:)-sr;
end
clear sr i j

% Standaryzacja macierzy M
for j=1:k
    os=0;
    for i=1:m
        os=os+(M(j,i)^2)/m;
    end
    os=sqrt(os);
    M(j,:)=M(j,:)/os;
end
clear os i j

% Określenie długości widma (lf)
lf=16*1024;

% Wyznaczenie widma macierzy M (MF)
for i=1:k
    MF(i,:)=abs(fft(M(i,:),lf));
end
clear i M

% Wyznaczenie dziedziny częstotliwościowej (f)
df=fpr/lf;
f=df*(0:lf-1);
clear df fpr

% Określenie nowej długości odcinków (m1)
m1=round(max(fxp))+50;
clear fxp

```

```

% Odrzucenie nieistotnej części widma
MF=MF(:,1:m1);
f=f(1:m1);

% Wyznaczenie maksimum macierzy widmowej MF (fx)
mx=zeros(1,k);
fx=zeros(1,k);
for j=1:k
    njw=0;
    for i=1:m1
        if MF(j,i)>njw
            njw=MF(j,i);
            mx(j)=i;
        end
    end
    dp=0;
    while
        (sum(MF(j,mx(j):mx(j)+dp))/(dp+1)>(0.75*MF(j,mx(j)))) & (mx(j)+dp<(m1-1))
            dp=dp+1;
        end
        dl=0;
        while (sum(MF(j,mx(j)-dl:mx(j)))/(dl+1)>(0.75*MF(j,mx(j)))) & (mx(j)-
dl>1)
            dl=dl+1;
        end
        poc=mx(j)-dl;
        kon=mx(j)+dp;
        mian=sum(MF(j,poc:kon));
        num=1:m1;
        lic=sum(MF(j,poc:kon).*num(poc:kon));
        w=lic/mian;
        wd=f(floor(w));
        wg=f(floor(w)+1);
        fx(j)=wd+(wg-wd)*(w-floor(w));
    end
clear MF dl dp f i j kon lf lic m m1 mian mx njw num poc w wd wg

% Usunięcie punktów będących dużymi zakłóceniami
x=k;
for i=1:10
    j=1;
    while j<x-1
        if or(fx(j+1)-fx(j)>20,fx(j+1)-fx(j)<-20)
            fx=[fx(1:j) fx(j+2:x)];
            t=[t(1:j) t(j+2:x)];
        end
        j=j+1;
        x=size(fx,2);
    end
    if or(fx(x)-fx(x-1)>20,fx(x)-fx(x-1)<-20)
        fx=fx(1:x-1);
        t=t(1:x-1);
    end
    if or(fx(x-1)-fx(x-2)>20,fx(x-1)-fx(x-2)<-20)
        fx=[fx(1:x-2) fx(x)];
        t=[t(1:x-2) t(x)];
    end
end
clear i j x

```

```

% Wyznaczenie wskaźnika zaszumienia wektora fx (wsk)
wsk=0;
for i=1:k-1
    wsk=wsk+(fx(i+1)-fx(i))^2;
end
wsk=wsk/k;
clear i

% Określenie granicznej wartości współczynnika zaszumienia wsp (gr)
gr=1.85;

% Wygładzenie wektora fx
fy=fx;
while wsk>gr
    fy(2)=sum(fx(1:3))/3;
    fy(3)=sum(fx(1:5))/5;
    fy(4)=sum(fx(1:7))/7;
    fy(5)=sum(fx(1:9))/9;
    fy(k-1)=sum(fx(k-2:k))/3;
    fy(k-2)=sum(fx(k-4:k))/5;
    fy(k-3)=sum(fx(k-6:k))/7;
    fy(k-4)=sum(fx(k-8:k))/9;
    for i=6:k-5
        fy(i)=sum(fx(i-5:i+5))/11;
    end
    fx=fy;

    wsk=0;
    for i=1:k-1
        wsk=wsk+(fx(i+1)-fx(i))^2;
    end
    wsk=wsk/k;
end
clear i wsk fy gr

% Wyznaczenie wektora prędkości kątowych (w)
w=fx*pi;
clear fx

% Wyznaczenie wektora przyspieszeń kątowych (p)
p=zeros(1,k-2);
for i=2:k-1;
    j=(w(i+1)-w(i))/(t(i+1)-t(i));
    d=(w(i)-w(i-1))/(t(i)-t(i-1));
    p(i-1)=(j+d)/2;
end
t=t(2:k-1);
w=w(2:k-1);
k=k-2;
clear i j d t

% Określenie parametrów pojazdu
fp=0.012;
fd=0.00005;
z=6.2363;
r=0.33;
I=0.6;
ms=100;
fn=5000;

```

```

% Wyznaczenie wektora oporów ruchu (opr)
v=(r*p)/(z);
mo=(r*fn*fp*(1+fd*v.^2)+ms)/z;
clear fp fd r ms fn v

% Wyznaczenie wektora momentów obrotowych wału korbowego silnika (m)
m=p*I+mo;
clear z I mo p

% Wygładzenie wektora momentu obrotowego silnika m
mw=m;
for j=1:2
    mw(2)=sum(m(1:3))/3;
    mw(3)=sum(m(1:5))/5;
    mw(4)=sum(m(1:7))/7;
    mw(5)=sum(m(1:9))/9;
    mw(k-1)=sum(m(k-2:k))/3;
    mw(k-2)=sum(m(k-4:k))/5;
    mw(k-3)=sum(m(k-6:k))/7;
    mw(k-4)=sum(m(k-8:k))/9;
    for i=6:k-5
        mw(i)=sum(m(i-5:i+5))/11;
    end
    m=mw;
end
m=m+m*0.02;
clear i j mw

% Usunięcie dodatkowych zakłóceń
for i=1:k-1
    a(i)=w(i+1)-w(i);
    b(i)=m(i+1)-m(i);
    c(i)=sqrt(a(i)^2+b(i)^2);
    kat(i)=asin(b(i)/c(i));
end
x=k;
for i=1:10
    j=1;
    while j<x-1
        if and(kat(j+1)-kat(j)>0.1, kat(j+1)*kat(j)<0)
            kat=[kat(1:j) kat(j+2:x)];
            m=[m(1:j) m(j+2:x)];
            w=[w(1:j) w(j+2:x)];
        end
        j=j+1;
        x=size(kat,2);
    end
    if and(kat(x)-kat(x-1)>0.1, kat(x)*kat(x-1)<0)
        kat=kat(1:x-1);
        m=m(1:x-1);
        w=w(1:x-1);
    end
    if and(kat(x-1)-kat(x-2)>0.1, kat(x-1)*kat(x-2)<0)
        kat=[kat(1:x-2) kat(x)];
        m=[m(1:x-2) m(x)];
        w=[w(1:x-2) w(x)];
    end
end
clear i j a b c kat x k

% Wyznaczenie wektora mocy silnika (p)
p=(m.*w)/1000;

```

```
% Wyznaczenie wektora prędkości obrotowych wału korbowego silnika (n)
n=w*60/(2*pi);
clear w

% Wykreślenie wykresów
subplot(211); plot(n,m,'black')
subplot(212); plot(n,p,'black')
```