ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2007
Seria: TRANSPORT z. 61 Nr kol. 1704

Rafał SROKA

WPŁYW METODY PRZETWARZANIA SYGNAŁU PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ SILNIKA NA DOKŁADNOŚĆ OKREŚLENIA JEJ NIERÓWNOMIERNOŚCI W CYKLU ROBOCZYM SILNIKA

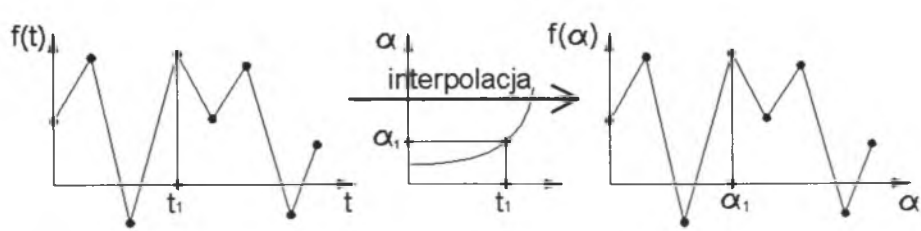
Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu metody przetwarzania sygnału prędkości obrotowej silnika na dokładność określenia jej nierównomierności w cyklu roboczym silnika. Badania zostały przeprowadzone na silniku pojazdu marki Opel Astra, o pojemności 1600 [cm^3] z zapłonem iskrowym oraz jednocylindrowym silniku wysokoprężnym marki Ruggerini, o pojemności 500 [cm^3].

INFLUENCE OF ANALYSIS METHODS ENGINE RPM SIGNAL ON PRECISION OF DETERMINE RPM FLUCTUATION IN ENGINE CYCLE

Summary. The results of investigations of analizys methods engine rpm signal influence on precision of determine rpm fluctuation in engine cycle are presented in this paper. The reasearch was conducted on Opel Astra combustion engine with 1600 [ccm] and Ruggerini diesel engine with 500 [ccm].

1. WPROWADZENIE

Zaawansowane metody analizy procesów wibroakustycznych na podstawie założenia dotyczącego stałej częstotliwości próbkowania [1]. Natomiast podstawową dziedziną, w której analizuje się większość procesów termodynamicznych i mechanicznych, zachodzących w silniku, jest dziedzina kątowa, określająca chwilowe położenie wału korbowego. Próbkowanie sygnału ze stałą, niezmienną częstotliwością próbkowania z tego powodu nazywane jest próbkowaniem asynchronicznym, ponieważ nie jest zsynchronizowane z dziedziną kątową silnika. Przejście z jednej dziedziny do drugiej jest z natury kłopotliwe, ale możliwe. W tym przypadku kluczowym problemem jest dokładne określenie zależności pomiędzy obiema dziedzinami. Jednym ze sposobów uzyskania możliwości przechodzenia pomiędzy dziedzinami jest asynchroniczne próbkowanie mierzonych sygnałów, połączone z rejestracją położenia kątowego wału korbowego, które w dalszej kolejności pozwala (już podczas analizy zgromadzonych danych) dokonać wspomnianej transformacji, wg. schematu na rysunku 1 [1].



Rys. 1. Przejście między dziedzinami z zastosowaniem interpolacji
Fig. 1. Conver between both domains using interpolation

2. BADANIA STANOWISKOWE

Cel badań i obiekt badań

Celem badań było określenie wpływu metody przetwarzania sygnału prędkości obrotowej silnika na dokładność wyznaczania jej nierównomierności w cyklu roboczym silnika.

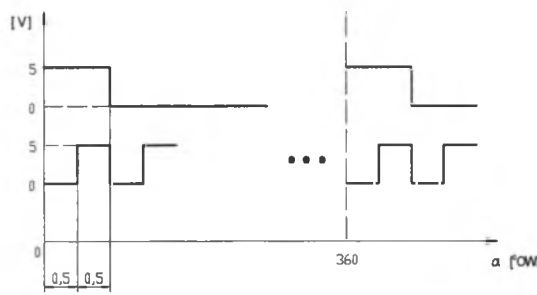
Obiektem badań był czterocylindrowy silnik pojazdu marki Opel Astra o pojemności 1600 [cm^3] z zapłonem iskrowym, przystosowany do zasilania paliwem benzynowym i paliwem gazowym oraz jednocylindrowy silnik wysokoprężny marki Ruggerini o pojemności 500 [cm^3].

Metodyka badań

Zabudowany w pojeździe silnik o zapłonie iskrowym badano na hamowni podwoziowej typu FLA 203 firmy Bosch. Natomiast silnik wysokoprężny umieszczono na hamowni silnikowej z hamulcem elektrowirowym. W trakcie badań, za pomocą komputera PC wyposażonego w kartę akwizycji danych NI-DAQ PCI 6143, rejestrowano następujące parametry pracy silnika:

- położenie kątowe wału korbowego silnika – α,
- przyspieszenia drgań korpusu silnika – a_X i a_Y,
- ciśnienie w cylindrze.

Położenie kątowe wału korbowego silnika było wyznaczane za pomocą znacznika położenia wału korbowego typu 2613B firmy Kistler, którego charakterystykę przedstawiono na rys. 2. Przyspieszenia drgań korpusu silnika były mierzone w płaszczyźnie prostopadłej do osi wału korbowego silnika i prostopadle do osi cylindra – a_X oraz równolegle do osi cylindra – a_Y.



Rys. 2. Charakterystyka znacznika położenia wału korbowego Kistler typu 2613B

Fig. 2. Characteristic of Kistler tachometer type 2613B

Silniki na stanowiskach badawczych przedstawione są na rys. 3 i 4.

Badania silnika pojazdu Opel Astra wykonano dla prędkości obrotowej równej (w przybliżeniu) 1500 [min^{-1}] i obciążenia 100 [%], przy zasilaniu paliwem benzynowym oraz paliwem gazowym.

Rys. 3. Opel Astra na stanowisku badawczym

Fig. 3. Opel Astra on research stand

Rys. 4. Silnik Ruggerini na stanowisku badawczym

Fig. 4. Ruggerini engine on research stand

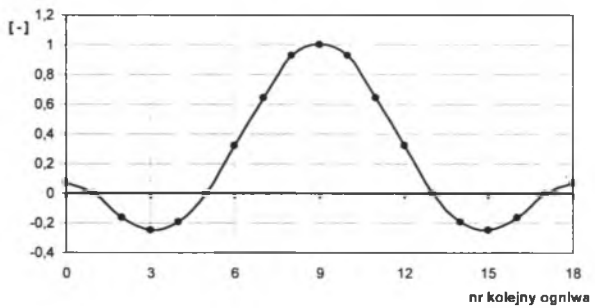
Badania silnika Ruggerini przeprowadzono dla prędkości obrotowej równej (w przybliżeniu) 1250 [min^{-1}] i obciążenia momentem hamującym M_H = 2,8 [Nm]. Częstotliwość próbkowania podczas badań była równa f_p = 50 [kHz] dla silnika pojazdu Opel Astra oraz f_p = 200 [kHz] dla silnika Ruggerini.

Wyniki badań

Sygnał znacznika położenia wału korbowego interpolowano:

- liniowo, współczynnik U = 4,
- liniowo, współczynnik U = 8,
- nieliniowo, współczynnik U = 4, 19-ogniwowy filtr interpolacyjny,
- nieliniowo, współczynnik U = 4, algorytm „dopasowujący".

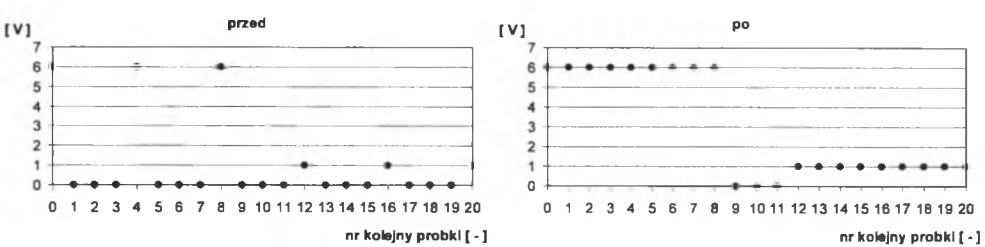
Współczynniki 19-ogniwowego filtru interpolacyjnego przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Współczynniki 19-ogniwowego filtru interpolacyjnego [2]
Fig. 5. Coefficients of 19-elements interpolation filter

Zasada działania algorytmu „dopasowującego" jest następującą:

a) Próbki sygnału o wartości x > 4,5 [V] zostają zastąpione próbkami o wartości 6 [V].
b) Próbki sygnału o wartości x < 0,5 [V] zostają zastąpione próbkami o wartości 1 [V].
c) Wartości próbek sygnału z przedziału 0,5 ≤ x ≤ 4,5 [V] zostają powiększone o 1 [V].
d) Pomiędzy każde 2 próbki sygnału oryginalnego zostają wprowadzone 3 próbki o wartości 0 [V] (interpolacja o czynnik U = 4).
e) Wprowadzone próbki o wartości 0 [V], znajdujące się pomiędzy próbkami oryginalnymi o tej samej wartości, przyjmują tę wartość – rys. 6.



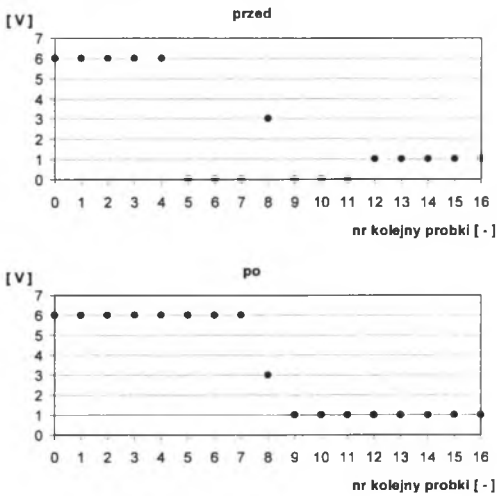
Rys. 6. Algorytm „dopasowujący" – krok e)
Fig. 6. „Fit" algorithm – step e)

f) Wprowadzone próbki o wartości 0 [V], znajdujące się w bezpośrednim sąsiedztwie próbki oryginalnej o wartości z przedziału 1,5 ≤ x ≤ 5,5 [V] otrzymują wartość próbki oryginalnej o wartościach 1 lub 6 [V] poprzedzającej je lub następującej po nich – rys. 7.
g) Wprowadzone próbki o wartości 0 [V], znajdujące się pomiędzy próbkami oryginalnymi o wartościach 1 i 6 [V], otrzymują wartości:

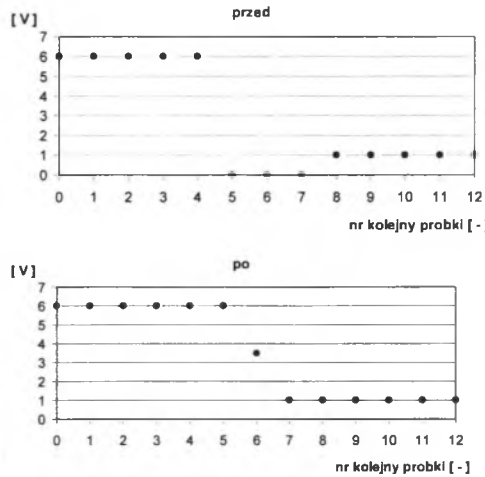
I) w przypadku gdy liczba próbek o wartościach 1 lub 6 [V] je poprzedzających lub następujących po nich jest sobie równa – pierwsza próbka wartość próbki oryginalnej ją poprzedzającej, druga próbka wartość 3,5 [V], trzecia próbka wartość próbki oryginalnej następującej po niej – rys. 8,

II) w przypadku gdy liczba próbek o wartościach 1 lub 6 [V] poprzedzających jest większa od liczby próbek po nich następujących – pierwsza próbka wartość próbki oryginalnej ją poprzedzającej, druga i trzecia próbka wartość próbki oryginalnej następującej po nich – rys. 9,

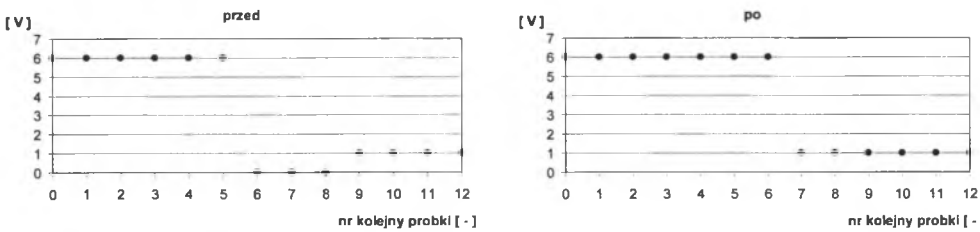
III) w przypadku gdy liczba próbek o wartościach 1 lub 6 [V] je poprzedzających jest mniejsza od liczby próbek po nich następujących – pierwsza i druga próbka wartość próbki oryginalnej je poprzedzającej, trzecia próbka wartość próbki oryginalnej następującej po niej.



Rys. 7. Algorytm „dopasowujący" – krok f)
Fig. 7. „Fit" algorithm – step f)



Rys. 8. Algorytm „dopasowujący" – krok I)
Fig. 8. „Fit" algorithm – step I)

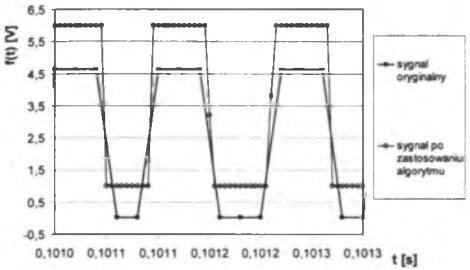


Rys. 9. Algorytm „dopasowujący" – krok II)
Fig. 9. „Fit" algorithm – step II)

Przykładowe przebiegi sygnału ze znacznika położenia wału korbowego przed i po filtracji przedstawiono na rys. 10 i 11.

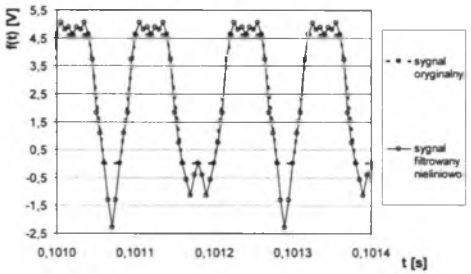
Prędkość obrotową n wyznaczamy ze wzoru 1: $n = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t}$, gdzie $\Delta\alpha = 1[^{\circ}\mathrm{OWK}]$. (1)

Przebiegi prędkości obrotowej w cyklu roboczym silnika, uzyskane przy zastosowaniu poszczególnych metod obróbki sygnału znacznika położenia wału korbowego, dla silnika pojazdu Opel Astra, przedstawiono na rys. 12, 13, 14, a dla silnika Ruggerini na rys. 15, 16, 17, 18, 19, 20.



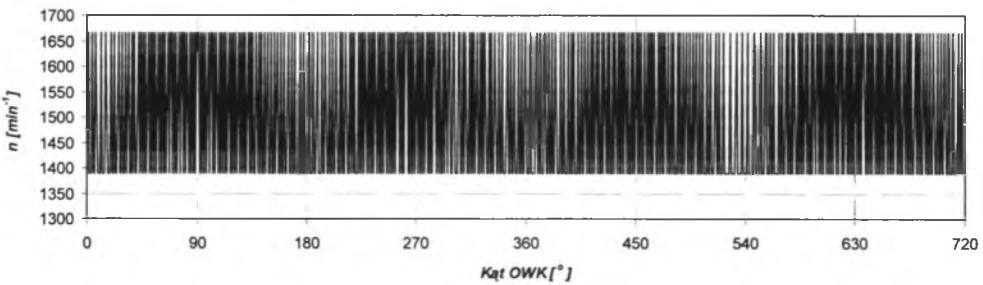
Rys. 10. Sygnał znacznika położenia wału korbowego przed i po użyciu algorytmu „dopasowującego"

Fig. 10. Signal data from tachometer beafore and after using „fit" algorithm



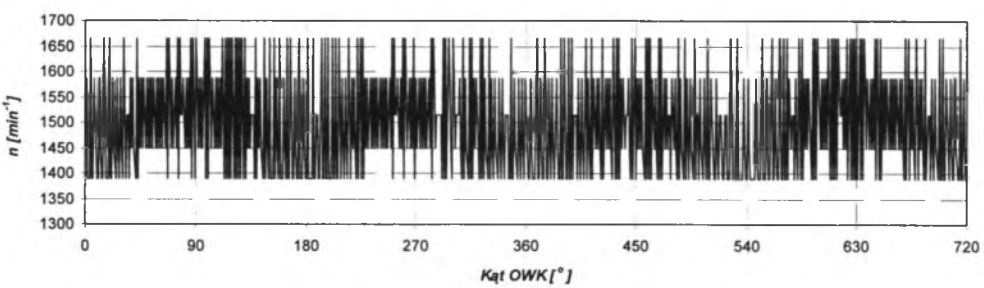
Rys. 11. Sygnał znacznika położenia wału korbowego przed i po użyciu filtru 19-ogniowego

Fig. 11. Signal data from tachometer beafore and after using 19-elements nonlinear filer



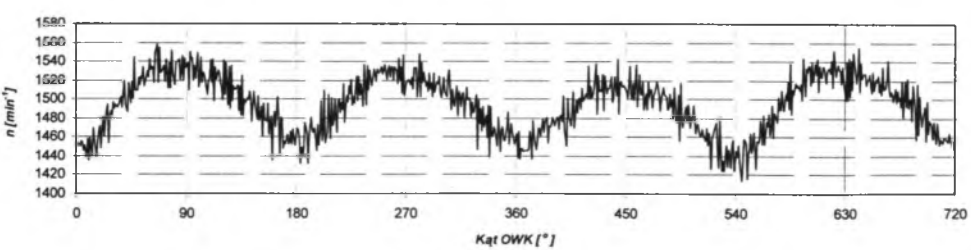
Rys. 12. Przebieg prędkości obrotowej, paliwo benzynowe, 100% obciążenie – brak filtracji

Fig. 12. RPM data, gasoline, full load – whitout filtering



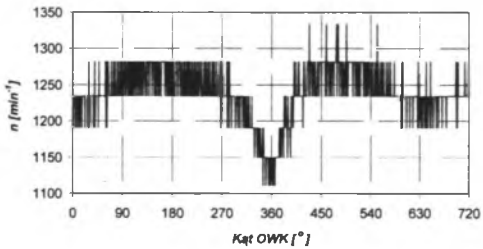
Rys. 13. Przebieg prędkości obrotowej, 100% obciążenie – algorytm „dopasowujący"

Fig. 13. RPM data, full load – "fit" algorithm

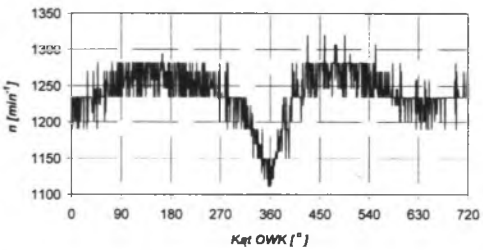


Rys. 14. Uśredniony przebieg prędkości obrotowej, 100% obciążenie – 100 cykli

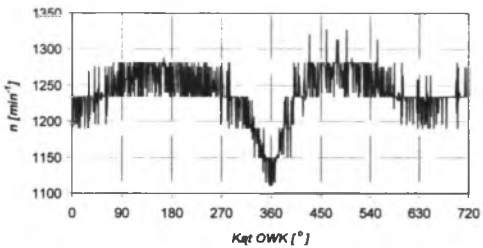
Fig. 14. Average RPM data, full load – "fit" algorithm



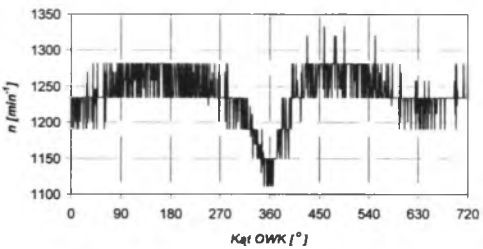
Rys. 15. Przebieg prędkości obrotowej, obciążenie $M_H = 2,8$ [Nm], brak filtracji
Fig. 15. RPM data, whitout filtering



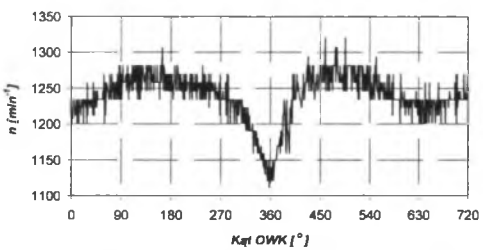
Rys. 16. Przebieg prędkości obrotowej, obciążenie $M_H = 2,8$ [Nm], liniowa U = 4
Fig. 16. RPM data, linear U = 4



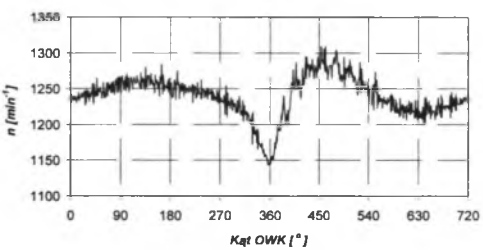
Rys. 17. Przebieg prędkości obrotowej, obciążenie $M_H = 2,8$ [Nm], liniowa U = 8
Fig. 17. RPM data, linear U = 8



Rys. 18. Przebieg prędkości obrotowej, obciążenie $M_H = 2,8$ [Nm], nieliniowa U = 4
Fig. 18. RPM data, nonlinear U = 4



Rys. 19. Przebieg prędkości obrotowej, obciążenie $M_H = 2,8$ [Nm], algorytm „dopasowujący"
Fig. 19. RPM data, „fit" algorithm



Rys. 20. Uśredniony przebieg prędkości obrotowej, obciążenie $M_H = 2,8$ [Nm], 20 cykli, algorytm „dopasowujący"
Fig. 20. Average RPM data, „fit" algorithm

Dla uzyskanych uśrednionych przebiegów prędkości obrotowej wyznaczono prędkość średnią $n_{śr}$ i odchylenie standardowe σ, wartości te zestawiono w tablicach 1 (Astra) i 2 (Ruggerini).

Aby zmienić dziedzinę czasu na dziedzinę kąta, należy wyznaczyć wymaganą liczbę próbek w dziedzinie kątowej, a co za tym idzie stałą próbkowania w tej dziedzinie. Następnie każdą z próbek f(k) w dziedzinie kątowej wyliczamy, korzystając z zależności przedstawionej na rys. 21 i określonej wzorem 2, przy użyciu najbliżej usytuowanych względem próbki f(k) próbek f(l) i f(l+1) takich, że $l \leq k < l+1$.

Tablica 1

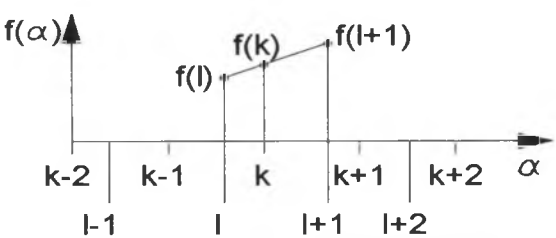
Prędkość średnia $n_{śr}$ i odchylenie standardowe σ – Opel Astra

	Rodzaj paliwa			
	Benzyna		LPG	
Metoda filtracji	$n_{śr}$ [min^{-1}]	σ [min^{-1}]	$n_{śr}$ [min^{-1}]	σ [min^{-1}]
Sygnał oryginalny	1498,90	33,15	1499,10	31,30
Liniowa U=4	1498,27	31,39	1498,04	30,55
Liniowa U=8	1498,37	31,41	1498,11	30,54
Nieliniowa U=4	1498,60	32,20	1498,31	30,59
Algorytm „dopasowujący"	1494,39	30,24	1494,05	28,45

Tablica 2

Prędkość średnia $n_{śr}$ i odchylenie standardowe σ – Ruggerini

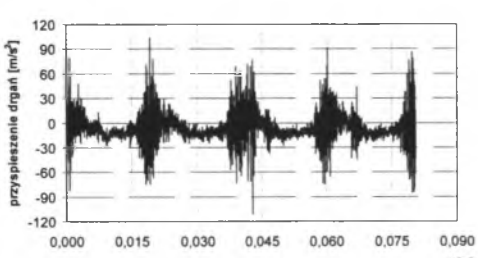
Metoda filtracji	$n_{śr}$ [min^{-1}]	σ [min^{-1}]
Sygnał oryginalny	1239,68	29,47
Liniowa U=4	1239,74	28,06
Liniowa U=8	1239,76	28,08
Nieliniowa U=4	1239,90	29,28
Algorytm „dopasowujący"	1239,76	28,66



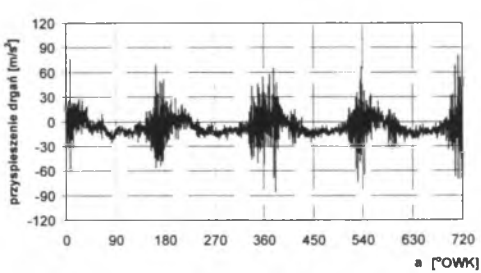
$$f(k)=\frac{(f(l+1)-f(l))(k-l)}{(l+1)-l}+f(l) \quad (2)$$

Rys. 21. Metoda obliczania próbek w dziedzinie kąta
Fig. 21. Method of samples calculation in angle domain

Na rys. 22 i 23 przedstawiono przebieg przyspieszeń drgań kadłuba silnika pojazdu Opel Astra wzdłuż osi x, w dziedzinach czasowych i kątowej, przy zasilaniu paliwem benzynowym.



Rys. 22. Przyspieszenia drgań kadłuba silnika pojazdu Opel Astra wzdłuż osi x w dziedzi-nie czasowej
Fig. 22. Vibration acceleration of Opel Astra engine in time domain



Rys. 23. Przyspieszeń drgań kadłuba silnika pojazdu Opel Astra wzdłuż osi x w dziedzinie kątowej
Fig. 23. Vibration acceleration of Opel Astra engine in angle domain

3. WNIOSKI

Przeprowadzone badania wykazały, że metoda przetwarzania sygnału prędkości obrotowej ma wpływ na określenie nierównomierności biegu badanego silnika. W wyniku wykonanej pracy został opracowany algorytm „dopasowujący", służący do przetwarzania sygnału pochodzącego ze znacznika położenia wału korbowego. Analizując wyniki zestawione w tablicach 1 i 2 stwierdzamy, że najniższe wartości odchylenia standardowego wyznaczonej prędkości obrotowej uzyskujemy przy zastosowaniu algorytmu „dopasowującego", natomiast najwyższe, gdy analizujemy prędkość obrotową, wyznaczoną z sygnału surowego.

Przy obróbce wyników zauważono, iż częstotliwość próbkowania f_p = 50 [kHz] jest niewystarczająca do w pełni wydajnej analizy nierównomierności prędkości obrotowej silnika w pojedyńczym cyklu pracy (brak czytelności rys. 12 i 13), natomiast jest wystarczająca do analizy przebiegów uśrednionych.

Dla silnika pojazdu Opel Astra zarejestrowano mniejszą nierównomierność prędkości obrotowej przy zasilaniu paliwem gazowym, w porównaniu do zasilania paliwem benzynowym.

Na wykresach przebiegu prędkości obrotowej w cyklu roboczym silnika można zaobserwować zdecydowanie odmienny charakter zmian prędkości obrotowej dla obu silników, co jest wywołane różna liczbą cylindrów w tych silnikach.

Przebiegi przyspieszeń drgań kadłuba silnika, uzyskane za pomocą stworzonej metody przejścia z dziedziny czasowej na kątowa, są podobne, co świadczy o jej poprawności.

Literatura

1. F. Lembregts, J. Top, F. Neyrinck: Off-line Synchronous Resamplin of Vibration Measurements. 0-7803-3312-8/96/$5.00©1996 IEEE.
2. R. G. Lyons: Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów. WKiŁ, Warszawa 1999.

Recenzent: Prof. nzw. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski

Praca wykonana w ramach BW-489/RT2/2007