

## **PROBLEMS WITH DETERMINATION OF FRICTION TORQUE FLUCTUATIONS AT THE COMBUSTION ENGINE WORK CYCLE**

**Antoni Iskra**

*Politechnika Poznańska*

*60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3*

*tel. (061) 6652511, fax. (061) 665 2514, e-mail: Antoni.Iskra@put.poznan.pl*

### **Summary**

*A car combustion engine usually works with the power below 50% of its nominal value. Under such conditions the total efficiency of the engine essentially depends on the mechanical efficiency. This kind of efficiency results mainly from friction losses at all stages of the work cycle [1]. There are measurement methods how to determine the instantaneous torque necessary to turn the crankshaft. The measurement of instantaneous moment, as opposed to the average moment, is not a simple task. The resulting torque is interfered by resonance oscillations of the system: combustion engine - electric machine. This physical phenomenon disturbs the real moment of the engine drive. In this paper the author proposes the elimination method of resonance oscillations from the measured torque signal.*

## **PROBLEMY OKREŚLENIA CHWILOWYCH WARTOŚCI MOMENTU OPORÓW TARCIA WEWNĘTRZNEGO W SILNIKU SPALINOWYM**

### **Streszczenie**

*W trakcie eksploatacji silnika spalinowego w samochodzie na ogół wykorzystuje się poniżej 50% mocy znamionowej, a w miarę zagęszczenia ruchu w dużych aglomeracjach jeszcze częściej zdarza się praca silnika na biegu jałowym. W takich warunkach sprawność ogólna silnika w znacznym stopniu zależy od sprawności mechanicznej, a dla biegu jałowego całe paliwo służy do pokonania tarcia wewnętrznego w silniku. Warunkiem wstępnym podjęcia prac mających na celu ograniczenie zużycia paliwa na biegu jałowym jest opanowanie pomiaru chwilowej wartości momentu obrotowego pozwalającego na pokonanie oporów tarcia w specyficznych warunkach biegu jałowego. W Politechnice Poznańskiej zostało zbudowane stanowisko pozwalające mierzyć moment sprzęgający silnik spalinowy z maszyną elektryczną służącą do hamowania lub napędzania silnika spalinowego.*

### **1. Wstęp**

Silnik spalinowy tworzy z maszyną elektryczną zespół drgający. Na przekazywany napędzający moment obrotowy nakłada się moment wynikający z drgań zespołu. Ponieważ częstotliwość różnych postaci drgań własnych zwykle różni się od częstotliwości obrotów silnika, to zmierzony moment sprzężenia nie przebiega identycznie w kolejnych cyklach pracy silnika. W referacie zostanie przedstawiony sposób transformacji sygnału pomiarowego pozwalający wyeliminować moment wywołany drganiami własnymi zespołu silnik spalinowy - maszyna elektryczna. Zostało zatem zbudowane stanowisko pozwalające rozpoznać problemy biegu jałowego i prowadzić badania nad optymalizowaniem tych specyficznych warunków użytkowania spalinowego silnika samochodowego. Niniejszy artykuł jest kontynuacją prac opublikowanych w ramach projektu KBN [1].<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Praca zrealizowana w ramach projektu badawczego KBN nr projektu 1423/T12/2003/25

## 2. Opis stanowiska do badań chwilowej wartości momentu tarcia wewnętrznego w silniku spalinowym

Podstawę uniwersalnego stanowiska badawczego silników spalinowych stanowi zespół badany silnik – maszyna napędzająco - hamująca. Od takiego standardu często się odstępuje w przypadku jednoznacznie określonych badań, np. jeśli planuje się rutynowe określanie charakterystyki zewnętrznej silnika. W takim przypadku badany silnik sprzęga się z maszyną pozwalającą jedynie na hamowanie, co zmniejsza koszt budowy stanowiska, oraz daje możliwość minimalizowania momentu bezwładności wirującego elementu hamulca. W badaniach zmierzających do ograniczenia niekorzystnych skutków pracy silnika na biegu jałowym najistotniejsze staje się ograniczenie oporów ruchu, co wymaga spełnienia dwóch warunków:

- 1- stanowisko badawcze powinno dawać możliwość napędzania badanego silnika,
- 2- konieczna staje się możliwość określenia chwilowej wartości momentu obrotowego wymaganego na pokonanie oporów ruchu.

W związku z koniecznością stosowania napędu zewnętrznego badanego silnika spalinowego zdecydowano o wyborze do tego celu elektrycznego silnika klatkowego. Taki silnik cechuje się małym momentem bezwładności wirnika. Należy oczywiście zastosować silnik o jak najmniejszej mocy wystarczającej jednak do napędu badanego silnika spalinowego. Silnik klatkowy cechuje się dobrą stałością momentu obrotowego, co stanowi podstawę badań chwilowych wartości momentu tarcia w badanym silniku spalinowym.

W tym miejscu należy sformułować cechy idealnego stanowiska do badania chwilowych wartości momentu tarcia wewnętrznego w silniku spalinowym w warunkach biegu jałowego, są to:

- 1- zerowa wartość momentu bezwładności wirnika maszyny napędzającej,
- 2- nieskończona sztywność momentomierza i wału sprzęgającego,
- 3- utrzymywanie przez maszynę napędzającą stałej zadanej prędkości obrotowej.

Przedstawione wymagania nawzajem się uzupełniają. Jeśli np. wartość momentu bezwładności maszyny napędzającej jest bardzo mała, to ograniczona sztywność momentomierza w mniejszym stopniu wpływa na amplitudę drgań zespołu: wał silnika badanego – wał maszyny napędzającej. Oczywiście, niska wartość momentu bezwładności wirnika maszyny napędzającej uniemożliwia przeprowadzanie zespołu przez obszary dużych momentów tarcia wewnętrznego w silniku spalinowym, bez konieczności maksymalnego zwiększenia momentu napędu. Wirnik maszyny napędzającej nie będzie zatem pełnił roli koła zamachowego.

Bardzo istotne jest utrzymywanie stałej wartości momentu przez maszynę napędzającą. W przypadku mierzenia wartości chwilowych momentu sprzężenia badanego silnika z maszyną napędzającą, cykliczność wahań momentu silnika elektrycznego może spowodować tak daleko idące zafałszowanie chwilowej wartości momentu sprzężenia z badanym silnikiem spalinowym, że wnioski z przeprowadzonych badań byłyby błędne. Niestety trudno dotrzeć do charakterystyk zmienności momentu silników elektrycznych w obszarze bardzo małych amplitud zmian. W tym celu planuje się przeprowadzenie badań momentu sprzężenia silnika klatkowego z wirnikiem o bardzo dużym momencie bezwładności na biegu jałowym.

Biorąc pod uwagę zadania jakie zostały postawione, zbudowano stanowisko, które starano się zbliżyć do stanowiska idealnego, co mogło się udać jedynie w ograniczonym zakresie.

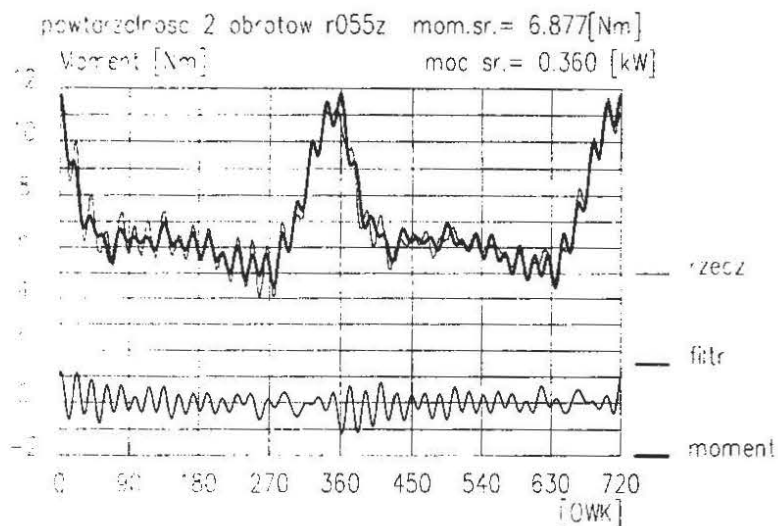
Do badań wybrano silnik dwucylindrowy czterosuwowy, służący do napędu samochodu Cinquecento. Wał silnika jest łożyskowany w dwóch punktach co ogranicza skutki wpływu nieosiowego wykonania gniazd łożyska na moment oporu konieczny do obracania wałem.

Do napędu badanego silnika spalinowego zastosowano elektryczny silnik klatkowy

cechujący się: niewielką wartością momentu bezwładności wirnika oraz względnie wyrównanym momentem sił pola magnetycznego między wirnikiem i stojanem silnika.

### 3. Wyniki pomiarów chwilowych wartości momentu sprzęgającego

Na rysunku 1 najcieńszą linią przedstawiono przebieg momentu sprzężenia badanego silnika spalinowego z maszyną napędzającą. Badania przeprowadzono przy bardzo małej prędkości obrotowej wynoszącej 500 [obr/min], co wynika z realizowanego zadania ograniczenia strat tarcia silników samochodowych na biegu jałowym. Jednym ze sposobów zmniejszenia strat tarcia i zużycia paliwa na biegu jałowym jest zmniejszenie prędkości obrotowej silnika w warunkach tego biegu. Przedstawiony na rys. 1 wykres jest dobrym przykładem zakłóceń, jakie mogą się pojawiać w próbach oceny chwilowej wartości momentu obrotowego. Przeprowadzone kalkulacje drgań własnych zespołu: wał badanego silnika spalinowego – wirnik maszyny napędzającej, wykazały, że częstotliwość pierwszej postaci drgań własnych wynosi 9750 [drgań/min] czyli jest 19,5 razy większa niż częstotliwość obrotów wału silnika. Jak łatwo zauważyć na rys. 1 na charakterystyczny przebieg momentu tarcia nałożony jest sygnał o znacznie większej częstotliwości niż przyrosty tarcia wynikające z cykli pracy silnika. Na jeden obrót wału silnika przypada 19,5 drgań sygnału.



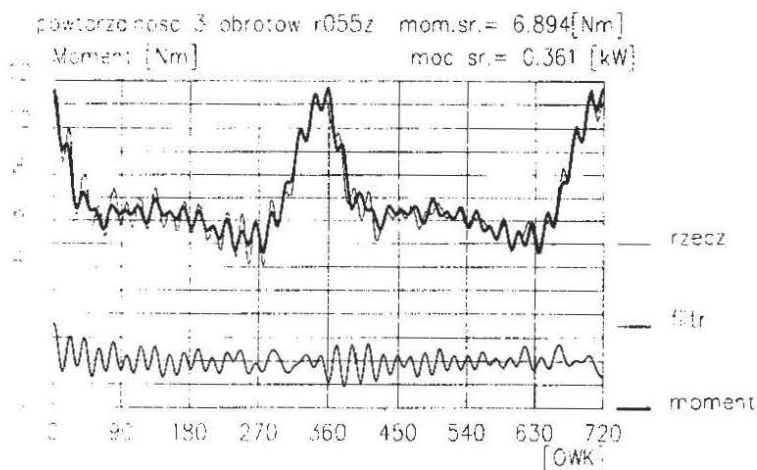
Rys. 1. Przebieg sygnału momentu sprzężenia silnika spalinowego z maszyną napędzającą – linia najcieńsza, przebieg momentu po odseparowaniu momentu wywołanego drganiami własnymi układu – linia najgrubsza, oraz moment wywołany drganiami własnymi układu – linia o pośredniej grubości

Fig. 1. Course of signal of „engine-electric machine” coupling moment – the thinnest line; course of the moment after filtration of system eigen vibrations – the thickest line; moment caused by system eigen vibrations – the medium line

Omawiane zakłócenie można dość łatwo wyeliminować zakładając, że przebieg sygnału w dwóch kolejnych obrotach powinien być dokładnie taki sam, co wynika z dwóch cylindrów silnika czterosuwowego. Po dokonaniu analizy harmonicznego sygnału rzeczywistego z dwóch obrotów – czyli 720° - można zauważyć, że tylko harmoniczne parzyste dają sygnał powtarzalny co 360°. Aby otrzymać sygnał powtarzalny w każdym obrocie wału należy zatem dokonać analizy harmonicznego, a następnie zsumować harmoniczne parzyste, przy czym otrzymany sygnał sumaryczny będzie odwzorowywał moment sprzężenia badanego silnika spalinowego z maszyną napędzającą. Taką operację wykonano, a sygnał sumaryczny został naniesiony na rys. 1 najgrubszą linią. Na rysunku 1 naniesiono również – linią o pośredniej grubości - sumę harmonicznych nieparzystych. Taką operację można nazwać odfiltrowaniem, przy czym średnia wartość odfiltrowanego sygnału powinna być zerowa, co - jak można zauważyć na rys. 1 -

sprawdza się.

Przeprowadzona transformacja sygnału sprzężenia badanego silnika spalinowego z maszyną napędzającą - mimo jej uzasadnienia - może budzić wątpliwości. Praktyka badań silników spalinowych wskazuje na cykliczność przebiegów większości parametrów związanych z realizacją cyklu roboczego, ale nie ma dowodu, że tak subtelne parametry jak siły tarcia w licznych parach kinematycznych układu tłokowo-korbowego są w pełni cykliczne. Pewnym sprawdzeniem postawionej tezy będzie przeprowadzenie podobnego procesu jak na rys. 1 ale dla trzech obrotów wału silnika. Oczywiście w takim przypadku sygnał zakłócający reprezentowany jest przez harmoniczne o rzędzie nie dzielącym się bez reszty przez 3. Wynik przeprowadzonej transformacji przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Przebiegi sygnałów momentu sprzężenia silnika spalinowego z maszyną napędzającą sporządzone wg procedury analogicznej jak na rys. 1 ale dla 3 obrotów wału silnika

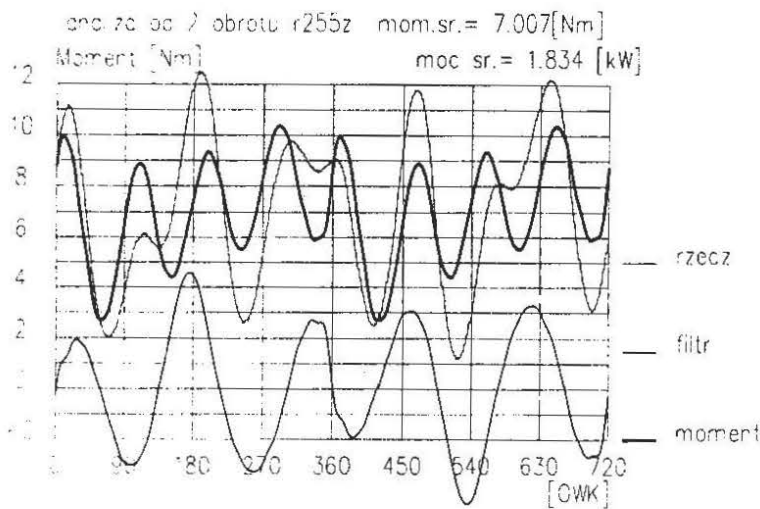
Fig. 2. Courses of signal of „engine-electric machine” coupling moment achieved according to procedure as in Fig. 1 but for 3 shaft revolutions

Porównując przebiegi momentu na rys. 1 i 2 po transformacji - linia najgrubsza, widać dużą zbieżność obu przebiegów. Podobny jest też przebieg sygnału odfiltrowanego, czyli sygnału odtwarzającego moment wywołany różnymi postaciami drgań własnych układu. Sygnał odfiltrowany naniesiony jest linią o pośredniej grubości.

Celem pracy jest badanie silnika w warunkach biegu jałowego. Nie ma jednak pewności, czy zaproponowany sposób eliminacji zakłóceń z sygnału momentu sił tarcia wewnętrznego w silniku spalinowym daje zadowalające rezultaty w zakresie prędkości obrotowych przeciętnego użytkownika silnika samochodowego. W dalszej części zostaną przedstawione próby wyodrębnienia z momentu sprzężenia silnika z maszyną napędzającą - momentu wywołanego drganiami własnymi zespołu.

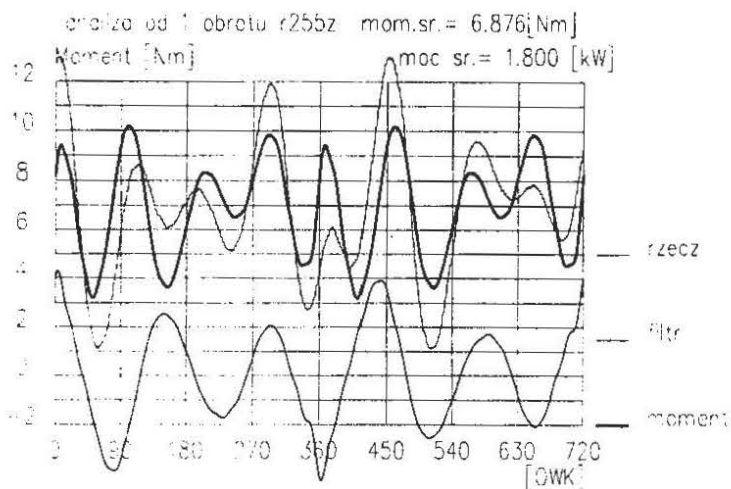
Na rys. 3 przedstawiono przebiegi analogiczne jak na rys. 1 ale dla prędkości obrotowej wału silnika równej 2500 [obr/min]. Przedstawiony moment sprzężenia uzyskano na podstawie analizy wyników uzyskanych w trakcie pierwszego i drugiego obrotu wału silnika w sesji pomiarowej.

Zakładając cykliczność zmian momentu tarcia w silniku spalinowym w ramach obrotu wału, należy się spodziewać, że analizując moment sprzężenia dla drugiego i trzeciego obrotu w sesji pomiarowej powinno się uzyskać analogiczne przebiegi jak na rys. 3. Odpowiednie wykresy przedstawiono na rys 4.



Rys. 3. Przebiegi sygnałów momentu sprzężenia silnika spalinowego z maszyną napędzającą sporządzone wg procedury analogicznej jak na rys. 1 dla pierwszego i drugiego obrotu zarejestrowanego w sesji pomiarowej; prędkość obrotowa wału – 2500 [obr/min]

Fig. 3. Courses of signal of „engine-electric machine” coupling moment achieved according to procedure as in Fig. 1, for the first and second revolution recorded in series; rotational speed – 2500 rpm

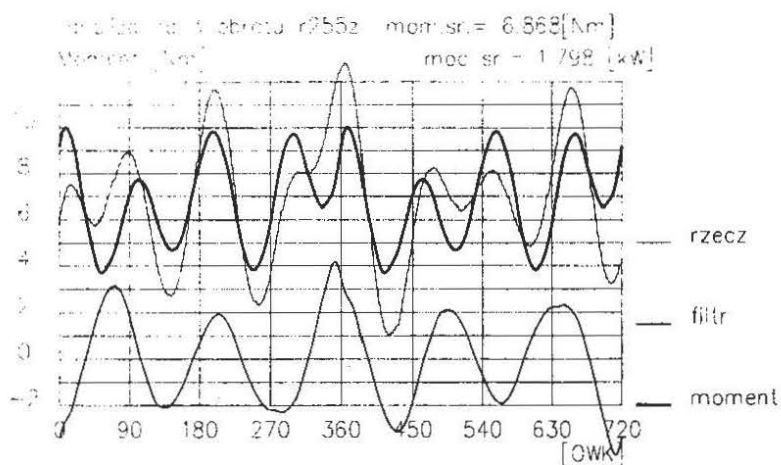


Rys. 4. Przebiegi sygnałów momentu sprzężenia silnika spalinowego z maszyną napędzającą sporządzone wg procedury analogicznej jak na rys. 1 dla drugiego i trzeciego obrotu zarejestrowanego w sesji pomiarowej; prędkość obrotowa wału – 2500 [obr/min]

Fig. 4. Courses of signal of „engine-electric machine” coupling moment achieved according to procedure as in Fig. 1, for the second and third revolution recorded in series; rotational speed – 2500 rpm

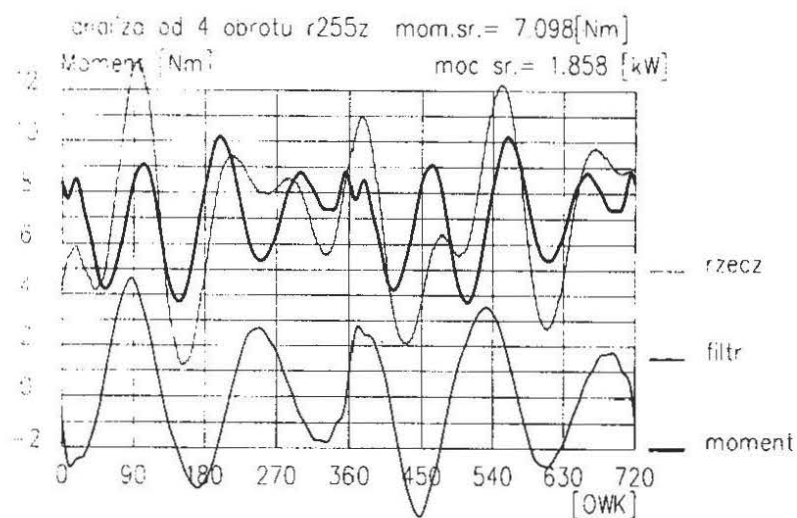
Porównując przebieg momentu po transformacji na rys. 3 i 4 można zauważyć różnice momentu chwilowego przekraczające 10%. Aby się upewnić, czy różnica nie jest przypadkowa przeprowadzono analizy przebiegu momentu w trakcie dalszych obrotów wału silnika tej samej sesji pomiarowej. Na rys. 5 przedstawiono wyniki uzyskane w trakcie trzeciego i czwartego obrotu, na rys. 6 – w trakcie czwartego i piątego obrotu oraz na rys. 7 – w trakcie piątego i szóstego obrotu.

Porównanie rys. 3 do 7 daje ciekawe wyniki. O ile wyniki na rys 4 i 5 są mniej zróżnicowane niż wyniki na rys. 3 i 4, to dla dalszych obrotów, dla których wyniki przedstawiono na rys. 6 i 7, znowu pojawiają się różnice przekraczające 10% wartości np. w stosunku do rys. 4. Okazuje się zatem, że transformacja zaproponowana dla prędkości obrotowej 500 [obr/min] daje mało wiarygodne wyniki w przypadku większych prędkości obrotowych. W tym miejscu nasuwa się przypuszczenie, że właściwą drogą oddzielenia od momentu tarcia momentu wywołanego drganiem, jest przeprowadzenie analizy harmonicznej dla większej liczby obrotów niż 2.



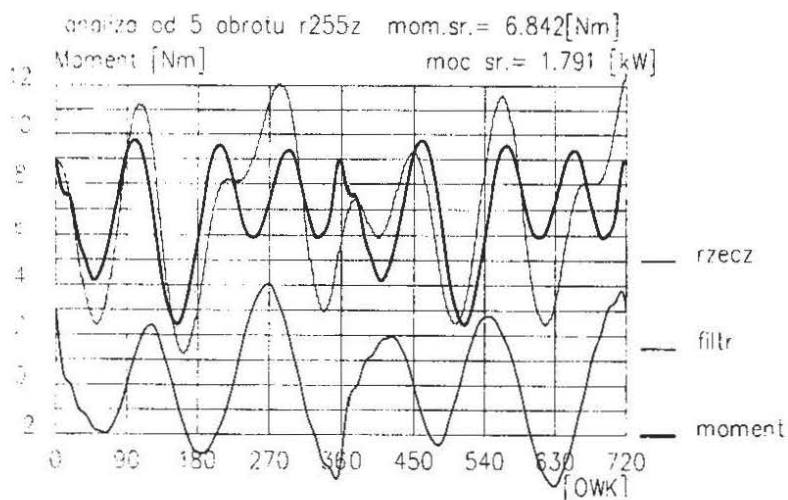
Rys. 5. Przebiegi sygnałów momentu sprzężenia silnika spalinowego z maszyną napędzającą sporządzone wg procedury analogicznej jak na rys. 1 dla trzeciego i czwartego obrotu zarejestrowanego w sesji pomiarowej; prędkość obrotowa wału – 2500 [obr/min]

Fig. 5. Courses of signal of „engine-electric machine” coupling moment achieved according to procedure as in Fig. 1, for the third and fourth revolution recorded in series; rotational speed – 2500 rpm



Rys. 6. Przebiegi sygnałów momentu sprzężenia silnika spalinowego z maszyną napędzającą sporządzone wg procedury analogicznej jak na rys. 1 dla czwartego i piątego obrotu zarejestrowanego w sesji pomiarowej; prędkość obrotowa wału – 2500 [obr/min]

Fig. 6. Courses of signal of „engine-electric machine” coupling moment achieved according to procedure as in Fig. 1, for the fourth and fifth revolution recorded in series; rotational speed – 2500 rpm



Rys. 7. Przebiegi sygnałów momentu sprzężenia silnika spalinowego z maszyną napędzającą sporządzone wg procedury analogicznej jak na rys. 1 dla piątego i szóstego obrotu zarejestrowanego w sesji pomiarowej; prędkość obrotowa wału – 2500 [obr/min]

Fig. 7. Courses of signal of „engine-electric machine” coupling moment achieved according to procedure as in Fig. 1, for the fifth and sixth revolution recorded in series; rotational speed – 2500 rpm

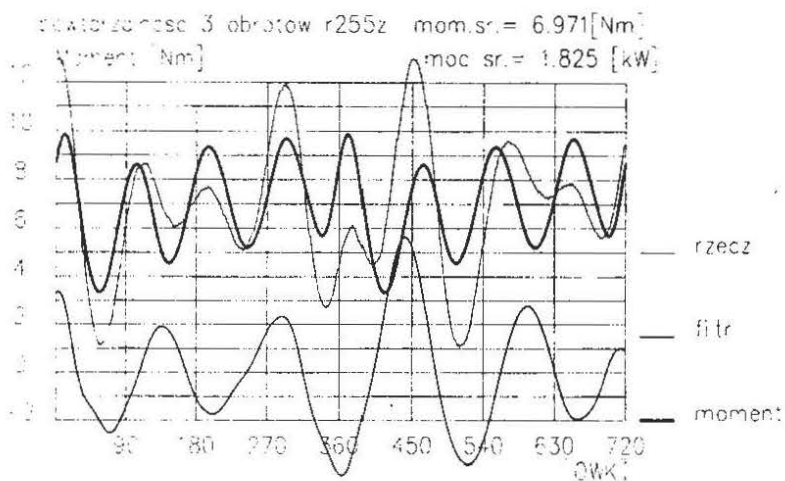
W celu zbadania liczby obrotów, jakie należy poddać analizie aby wynik był niezależny od przypadkowego pomiaru przeprowadzono analizę harmoniczną dla:

- obrotów 1, 2 i 3,

- obrotów 1, 2, 3 i 4,
- obrotów 1, 2, 3, 4 i 5 oraz
- obrotów 1, 2, 3, 4, 5, i 6.

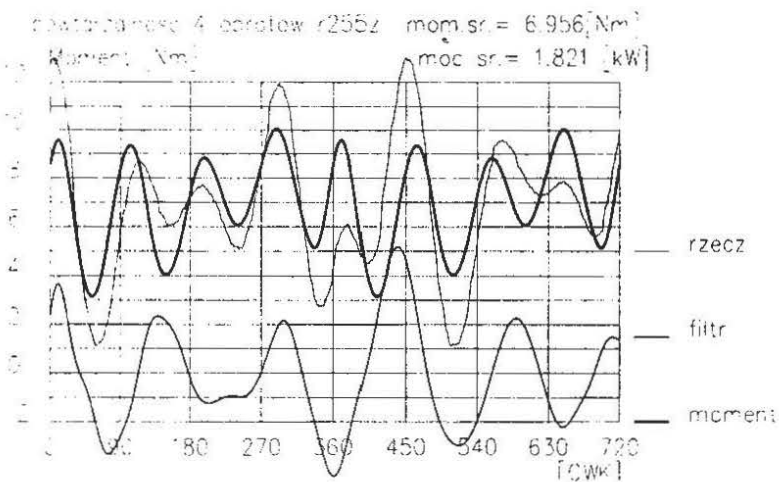
Uzyskane wyniki przedstawiono odpowiednio na rys. 8 do 11.

Należy dodać, że zwiększając liczbę obrotów poddawanych analizie harmoniczej zwiększano proporcjonalnie również liczbę wyznaczanych harmoniczných. O ile dla dwóch obrotów wyznaczano 40 harmoniczných, to np. dla 6 obrotów liczba wyznaczonych harmoniczných była 3 razy większa, czyli wyznaczono 120 harmoniczných. Należy również przypomnieć, że w każdym przypadku stosowano tę samą zasadę traktowania harmoniczných o liczbie niepodzielnej przez liczbę analizowanych obrotów jako harmoniczných wywołanej drganiami własnymi układu silnik spalinowy – maszyna napędzająca.



Rys. 8. Przebiegi sygnałów momentu sprzężenia silnika spalinowego z maszyną napędzającą sporządzone wg procedury analogicznej jak na rys. 1 dla obrotów: 1, 2 i 3 zarejestrowanych w sesji pomiarowej; prędkość obrotowa wału – 2500 [obr/min]

Fig. 8. Courses of signal of „engine-electric machine” coupling moment achieved according to procedure as in Fig. 1, for the first, second and third revolution recorded in series; rotational speed – 2500 rpm

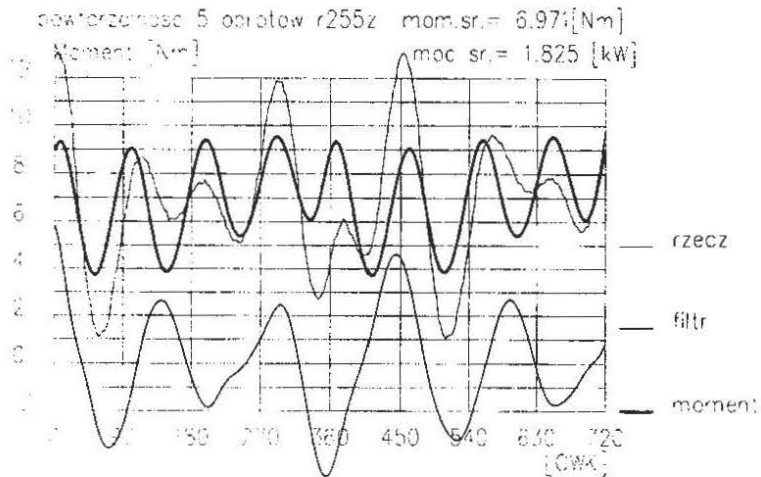


Rys. 9. Przebiegi sygnałów momentu sprzężenia silnika spalinowego z maszyną napędzającą sporządzone wg procedury analogicznej jak na rys. 1 dla obrotów: 1, 2, 3 i 4 zarejestrowanych w sesji pomiarowej; prędkość obrotowa wału – 2500 [obr/min]

Fig. 9. Courses of signal of „engine-electric machine” coupling moment achieved according to procedure as in Fig. 1, for the first, second, third and fourth revolution recorded in series; rotational speed – 2500 rpm

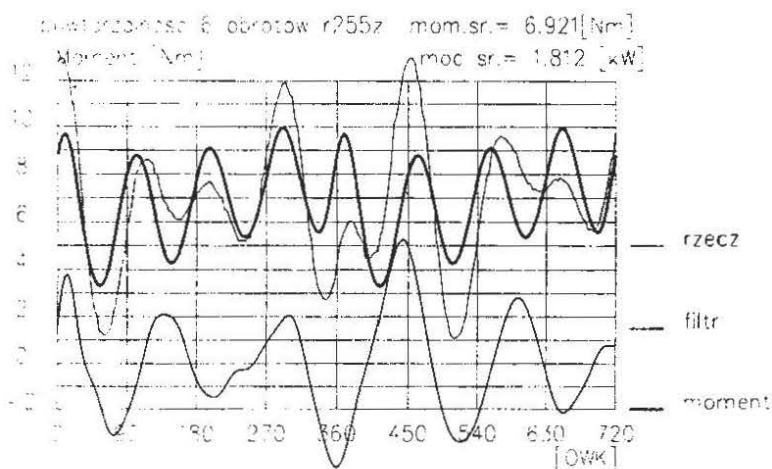
Już z pobieżnej analizy przebiegu momentów sprzęgających silnik spalinowy z maszyną napędzającą jednoznacznie wynika, że kolejne zwiększenia liczby analizowanych obrotów stabilizują wyznaczony przebieg momentu sprzężenia wywołanego tarciami wewnętrznymi w silniku. Pozostaje jednak bez odpowiedzi pytanie, czy zabieg prowadzący do przetworzenia zmierzonego momentu sprzężenia silnika spalinowego z maszyną napędzającą jest właściwą drogą do określenia chwilowej wartości momentu sił tarcia zachodzącego w silniku spalinowym.

Na pytanie to nie będzie można odpowiedzieć tak długo jak długo nie zostaną wykryte ewentualne zjawiska powodujące niepowtarzalność procesu tarcia w kolejnych cyklach pracy silnika.



Rys. 10. Przebiegi sygnałów momentu sprzężenia silnika spalinowego z maszyną napędzającą sporządzone wg procedury analogicznej jak na rys. 1 dla obrotów: 1, 2, 3, 4 i 5 zarejestrowanych w sesji pomiarowej; prędkość obrotowa wału – 2500 [obr/min]

Fig. 10. Courses of signal of „engine-electric machine” coupling moment achieved according to procedure as in Fig. 1, for the first, second, third, fourth and fifth revolution recorded in series; rotational speed – 2500 rpm



Rys. 11. Przebiegi sygnałów momentu sprzężenia silnika spalinowego z maszyną napędzającą sporządzone wg procedury analogicznej jak na rys. 1 dla obrotów: 1, 2, 3, 4, 5 i 6 zarejestrowanych w sesji pomiarowej; prędkość obrotowa wału – 2500 [obr/min]

Fig. 11. Courses of signal of „engine-electric machine” coupling moment achieved according to procedure as in Fig. 1, for the first, second, third, fourth, fifth and sixth revolution recorded in series; rotational speed – 2500 rpm

#### 4. Wnioski

1. Chwilowe wartości momentu sprzężenia silnika spalinowego z maszyną hamującą znacznie się różnią w kolejnych obrotach wału sprzęgającego zespół, gdyż są zakłócone drganiami własnymi tego zespołu.
2. Chwilowa wartość momentu tarcia wewnętrznego w silniku spalinowym może być określona metodą eliminacji harmonicznymi nie będącymi harmonicznymi głównymi.
3. Analizowany sygnał momentu powinien obejmować co najmniej 3-krotną wartość liczby suwów przypadającą na cykl pracy podzieloną przez liczbę cylindrów w silniku.

#### Literatura

- [1] Iskra A., Określenie zmian momentu tarcia w cyklu pracy silnika spalinowego. KONMOT-AUTOPROGRES 2004. Kraków-Zakopane 23-26.09.2004