CZASOPISMO TECHNICZNE M
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

z. 7-M/2008
ISSN 0011-4561
ISSN 1897-6328

ANTONI ISKRA, JAROSŁAW KAŁUŻNY, MACIEJ BABIAK*

MOŻLIWOŚCI POPRAWY STOPNIA NIERÓWNOMIERNOŚCI BIEGU 3-CYLINDROWEGO SILNIKA SPALINOWEGO W UKŁADACH HYBRYDOWYCH

POSSIBILITY OF IMPROVING THE COEFFICIENT OF FLUCTUATION OF SPEED IN A THREE-CYLINDER COMBUSTION ENGINE IN HYBRID SYSTEMS

Streszczenie

Obecne wymagania ekonomiczne i ekologiczne sprawiają, że 3-cylindrowe silniki spalinowe stają się coraz bardziej popularnym źródłem napędu samochodów. Jednym z problemów ograniczających możliwość zastosowania takich silników jest znaczna nierównomierność biegu wynikająca z małej liczby cylindrów. W artykule przeanalizowano możliwość poprawy stopnia nierównomierności biegu 3-cylindrowego silnika spalinowego wynikającą ze sprzężenia z silnikiem elektrycznym w hybrydowym układzie napędowym samochodu. W artykule przedstawiono przebiegi chwilowych wartości prędkości obrotowej w układzie przeniesienia napędu silnika 3-cylindrowego sprzężanego z maszyną elektryczną, której wirnik zastępuje koło zamachowe.

Słowa kluczowe: *stopień nierównomierności biegu, hybrydowe układy napędów*

Abstract

Contemporary economical and ecological requirements make that 3-cylinder IC engines become more popular automotive drive. One of the problems limiting the wide utilization of such engines is a considerable run irregularity resulting from the low number of cylinders. The paper presents an analysis of a possible improvement in 3-cylinder engine run irregularity resulting from coupling to an electric motor in an automotive hybrid drive system. The paper presents the courses of rotational speed momentary value in the 3-cylinder – electric machine drive, when the latter replaces the flywheel.

Keywords: *run irregularity level, hybrid drives*

* Prof. dr hab. inż. Antoni Iskra, dr inż. Jarosław Kałużny, mgr inż. Maciej Babiak, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Politechnika Poznańska.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

O liczbie cylindrów silnika napędzającego samochód osobowy decydują oczekiwane właściwości jednostki napędowej. Jeśli silnik ma się cechować spokojną pracą bez drgań wywołanych tak niezrównoważonymi siłami I i II rzędu, jak i zmiennym momentem sił gazowych, to przyjmuje się co najmniej 4 cylindry, przy czym optymalną jednostkę stanowi silnik rzędowy 6-cylindrowy. Jeśli z kolei silnik ma być tani w produkcji, a poza tym wykazywać wysoką sprawność mechaniczną η_m, to coraz częściej stosuje się silniki 3-cylindrowe.

Niestety, silniki 3-cylindrowe wykazują niekorzystny przebieg stopnia nierównomierności biegu δ, w szczególności w warunkach zbliżonych do biegu jałowego. Okazuje się, że ta podstawowa wada silnika 3-cylindrowego może być w znacznym stopniu ograniczona przez wykorzystanie w napędach hybrydowych maszyny elektrycznej do ograniczania momentu obrotowego w przypadku jego nadwyżki i wspomagania tego momentu w warunkach jego niedoboru, czyli w trakcie realizacji tzw. suwów pomocniczych. Układy hybrydowe, często w kontekście napędów alternatywnych, są ostatnio tematem wielu publikacji [1, 2], dlatego w niniejszym artykule pominięto szczegóły takich rozwiązań. Oddzielny problem stanowią momenty sił I i II rzędu równe odpowiednio:

– $1{,}73\, m_p r\omega a$,
– $1{,}73\, m_p r\omega^2 \lambda a$,

gdzie:

- m_p – masa wykonująca wraz z tłokiem ruch postępowo-zwrotny,
- r – promień korby,
- ω – prędkość kątowa wału,
- λ – stosunek promienia korby do odległości między osiami stopy i główki korbowodu,
- a – odległość między osiami cylindrów.

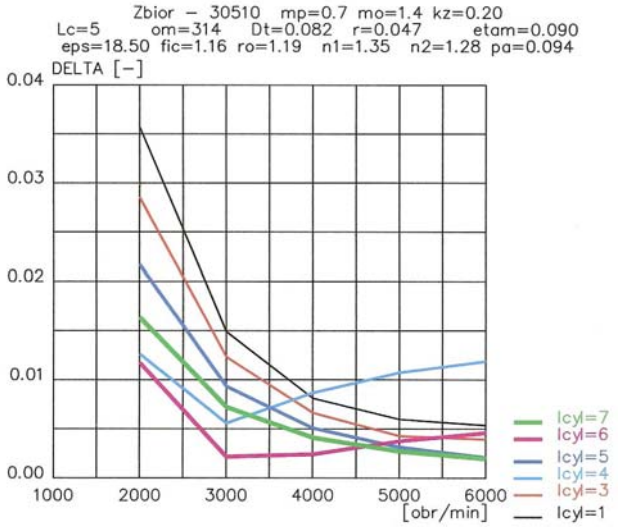
Wyrównoważenie tych momentów wymaga stosowania odpowiednich przeciwciężarów napędzanych stosownymi przekładniami. Ze względu na koszty zwykle w silnikach 3-cylindrowych nie wyrównoważa się momentów wywołanych siłami I i II rzędu.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono możliwości poprawy stopnia nierównomierności biegu wybranego silnika spalinowego. Praktyczna realizacja koncepcji będzie wymagała wykonania odpowiednich pomiarów momentu sprzężenia zespołu hybrydowego z odbiornikiem mocy. Nie jest to zadanie proste, ale przeprowadzone próby pomiaru tego momentu z wykorzystaniem metody opisanej w [3] pozwalają przypuszczać, że wyniki teoretyczne przedstawione w niniejszym artykule zostaną potwierdzone doświadczalnie.

2. Stopień nierównomierności biegu w silnikach rzędowych

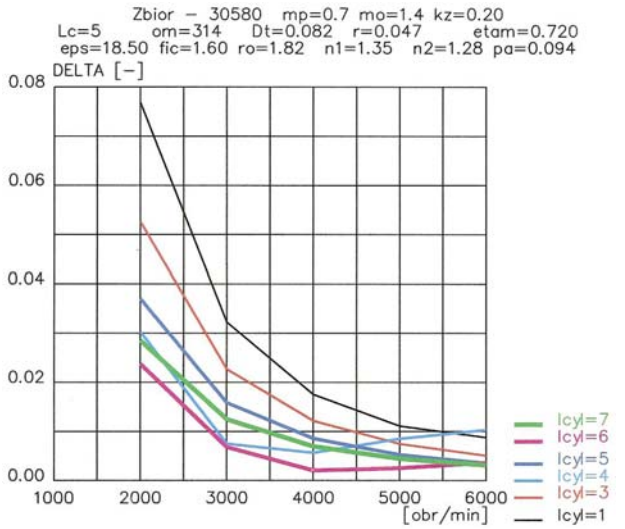
W silnikach rzędowych czterosuwowych kształtowanie się stopnia nierównomierności biegu δ nie podlega łatwym do sprecyzowania regułom. Na stopień δ w sposób zróżnicowany wpływają obciążenie silnika i prędkość obrotowa w zależności od liczby cylindrów. W szczególności dla parzystej liczby cylindrów stopień nierównomierności biegu może wraz z rosnącą prędkością obrotową silnika początkowo maleć, a następnie znowu wzrastać. Dla silników o nieparzystej liczbie cylindrów wraz ze zwiększaniem prędkości obrotowej stopień δ monotonicznie maleje (rys. 1).

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 1. Zależność wartości stopnia nierównomierności biegu silnika δ (DELTA) od średniej prędkości obrotowej *n* dla niewielkiego obciążenia silnika wynoszącego 10% obciążenia znamionowego

Fig. 1. Dependence of engine rotational irregularity δ on a mean rotational speed *n* for a load of order of 10% nominal



Rys. 2. Zależność wartości stopnia nierównomierności biegu silnika δ (DELTA) od średniej prędkości obrotowej *n* dla obciążenia silnika zbliżonego do warunków znamionowych

Fig. 2. Dependence of engine rotational irregularity δ on a mean rotational speed *n* for a load close to nominal

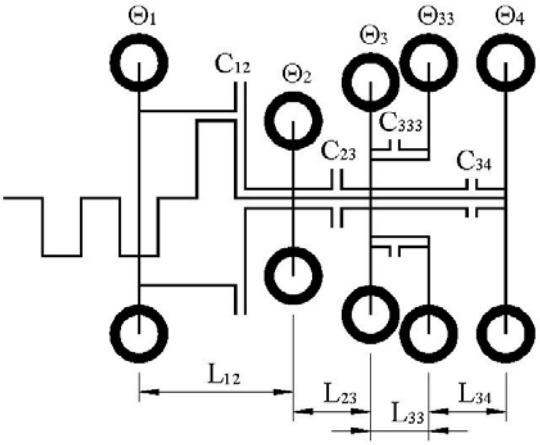
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Dla obciążenia silnika zbliżonego do mocy znamionowej charakter zjawiska pozostaje podobny, jedynie dla parzystej liczby cylindrów minimum stopnia nierównomierności biegu przesuwa się w kierunku większych prędkości obrotowych (rys. 2).

Jak wynika z rysunków 1 i 2, silnik 3-cylindrowy cechuje się prawie w całym przedziale prędkości obrotowych stosunkowo dużą nierównomiernością biegu. Pod tym względem jedynie silniki 1- i 2-cylindrowy wykazują jeszcze mniej równomierny bieg. W konsekwencji w przypadku silnika 3-cylindrowego stosuje się zwykle koło zamachowe o dużym momencie bezwładności, co zwiększa masę całego silnika, a przede wszystkim zwiększa czas osiągania maksymalnych prędkości obrotowych. Nie trzeba więc uzasadniać, że przejęcie roli koła zamachowego przez maszynę elektryczną w układach hybrydowych dla silnika spalinowego 3-cylindrowego jest szczególnie wskazane.

3. Parametry drgań w łańcuchu przeniesienia napędu z silnika 3-cylindrowego

Schemat układu zastępczego stanowiącego łańcuch przeniesienia napędu z silnika 3-cylindrowego na koła samochodu przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat zastępczy łańcucha napędowego 3-cylindrowego silnika spalinowego

Fig. 3. Substitute schematic of the 3-cylinder engine drive train

Na rysunku przyjęto następujące oznaczenia:

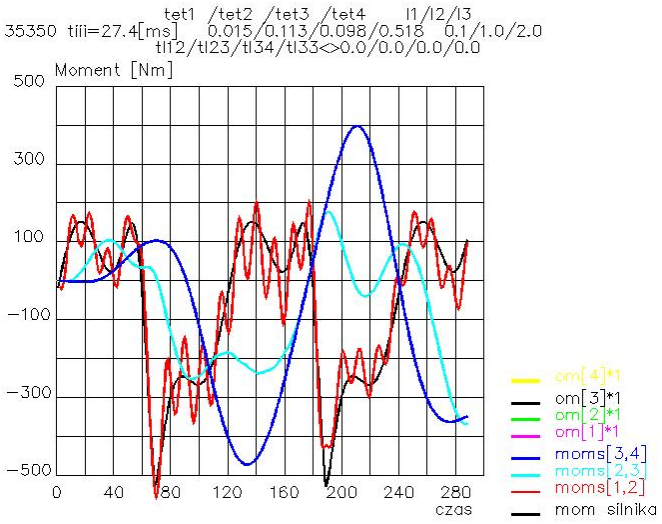
Θ_1 – masowy moment bezwładności wału i mas postępowo zwrotnych,
Θ_2 – masowy moment bezwładności koła zamachowego sprzężonego z wałem,
Θ_3 – masowy moment bezwładności koła zamachowego sprzężonego podatnie,
Θ_{33} – masowy moment bezwładności dodatkowego koła zamachowego sprzężonego podatnie,
Θ_4 – masowy moment bezwładności odbiornika mocy,
C_{12} – tłumienie w zespole układu tłokowo-korbowego,
C_{23} – tłumienie w sprzęgle koła zamachowego sprzężonego podatnie,

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

C_{333} – tłumienie w sprzęgle dodatkowego koła zamachowego,
C_{34} – tłumienie w zespołach przeniesienia napędu na odbiornik mocy,
L_{12} – długość zastępcza wału korbowego,
L_{23} – długość zastępcza odzwierciedlająca sztywność sprzęgła koła zamachowego sprzężonego podatnie,
L_{33} – długość zastępcza odzwierciedlająca sztywność sprzęgła dodatkowego koła zamachowego,
L_{34} – długość zastępcza przeniesienia napędu na odbiornik mocy.

W przedstawionym układzie przeniesienia napędu generowane są złożone drgania, które mimo zastosowania nowoczesnego trójbezwładnościowego koła zamachowego mogą osiągać amplitudę znacznie przekraczającą średnią wartość momentu generowanego przez silnik. Przykładowy przebieg momentu w układzie przeniesienia napędu silnika 3-cylindrowego przedstawiono na rys. 4.

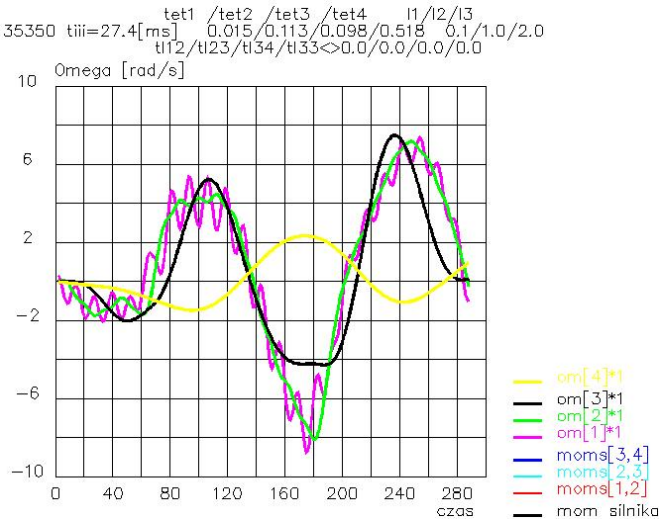
Z punktu widzenia analizowanego problemu istotny jest jednak przebieg chwilowych prędkości obrotowych wywołanych momentem przedstawionym na rys. 4. Wahania prędkości obrotowych elementów, o masowych momentach bezwładności, odpowiednio Θ_1, Θ_2, Θ_3 i Θ_4, przedstawiono na rys. 5.



Rys. 4. Przebieg momentu w układzie przeniesienia napędu silnika 3-cylindrowego; moms[1, 2] – na odcinku L_{12} – zgodnie z rys. 3, moms[2, 3] – na odcinku L_{23}, moms[3, 4] – na odcinku L_{34}

Fig. 4. Course of torque in 3-cylinder drive train; section L_{12} – moms[1, 2], section L_{23} – moms [2, 3], section L_{34} – moms[3, 4]

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 5. Przebieg chwilowej prędkości obrotowej w układzie przeniesienia napędu silnika 3-cylindrowego; om[1] dla bezwładności Θ_1 – zgodnie z rys. 3, om[2] – dla bezwładności Θ_2, om[3] – dla bezwładności Θ_3, om[4] – dla bezwładności Θ_4

Fig. 5. Course of rotational speed momentary value in 3-cylinder engine drive train: om[1] for Θ_1 inertia, om[2] for Θ_2 inertia, om[3] for Θ_3 inertia, om[4] for Θ_4 inertia according to Fig. 3

4. Parametry przeniesienia napędu korygowane momentem maszyny elektrycznej

Zgodnie z koncepcją korekcja momentu obrotowego w elementach przeniesienia napędu polega na zastąpieniu koła zamachowego o bezwładności Θ_2 wirnikiem maszyny elektrycznej. Abstrahując od aktualnych możliwości precyzyjnego generowania w maszynie elektrycznej momentu negatywnego w stosunku do momentu silnika spalinowego, można wykazać, że gdyby współczesna technika regulacji pozwalała na takie rozwiązania, to przebiegi momentu przedstawione na rys. 4 byłyby skorygowane do postaci przedstawionej na rys. 6.

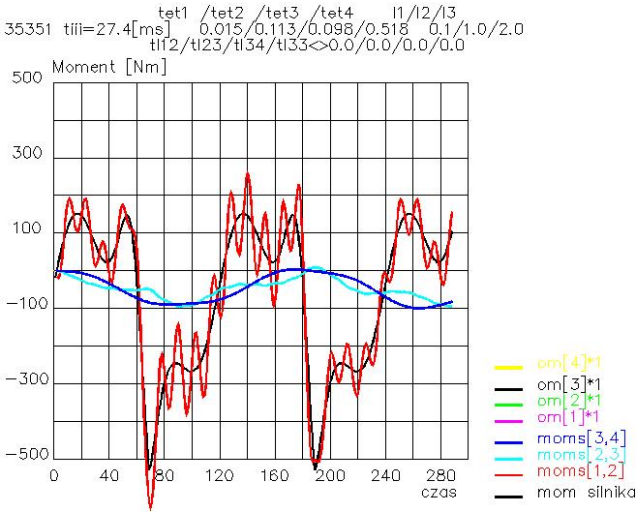
Negatywny – w stosunku do silnika spalinowego – moment generowany przez maszynę elektryczną cechuje się oczywiście wartością średnią równą 0 Nm, co jest warunkiem ograniczonej wartości impulsów energetycznych pobieranych i przekazywanych do układu przez maszynę elektryczną. Podstawowy problem stanowi więc nadążanie układów zasilających maszynę elektryczną za zmieniającym się chwilowym momentem generowanym przez tłokowy silnik spalinowy.

Porównując odpowiednie przebiegi momentów na rys. 4 i 6, należy przede wszystkim podkreślić prawie 5-krotne zmniejszenie amplitudy momentu moms[3, 4], a więc momentu przekazywanego na odbiornik mocy.

Przedstawiony przykład nie uwzględnia wszystkich czynników mogących wpływać na ostateczny kształt przebiegu momentu przejmowanego przez odbiornik mocy, a więc np. koła samochodu. Nie ulega jednak wątpliwości, że zasadnicze różnice w przebiegu momentu skorygowanego maszyną elektryczną przedstawionego na rys. 6 przyczynią się do

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

bardziej niezawodnego przenoszenia napędu do odbiornika mocy. W szczególności zostanie ograniczony hałas generowany w układzie przeniesienia napędu. Dowodem na prawdziwość ostatniej tezy jest przebieg skorygowanych chwilowych prędkości obrotowych wywołanych momentami przedstawionymi na rys. 6. Odpowiednie przebiegi prędkości obrotowych przedstawiono na rys. 7.



Rys. 6. Przebieg momentu w układzie przeniesienia napędu silnika 3-cylindrowego sprzężonego z maszyną elektryczną, której wirnik zastępuje koło zamachowe Θ_2 – rys. 3; moms[1, 2] – na odcinku L_{12} – zgodnie z rys. 3, moms[2, 3] – na odcinku L_{23}, moms[3, 4] – na odcinku L_{34}

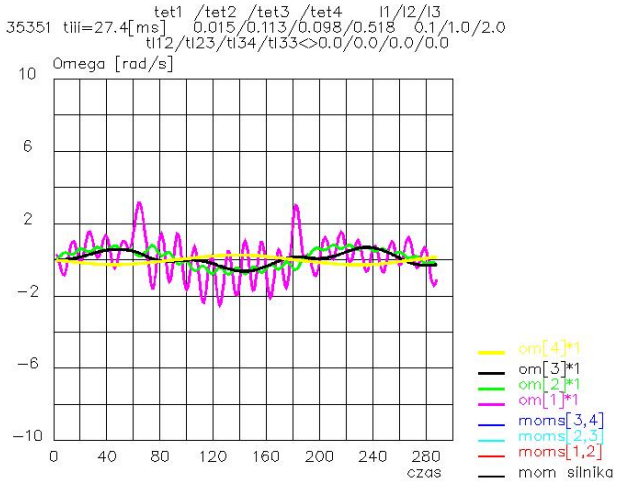
Fig. 6. Course of torque in 3-cylinder engine-electric machine drive train where rotor Θ_2 replaces flywheel; section L_{12} – moms[1, 2], section L_{23} – moms[2, 3], section L_{34} – moms[3, 4] (as in Fig. 3)

Niestety, zastosowane rozwiązanie w niewielkim stopniu wpływa na drgania wału korbowego do przekroju jego połączenia z wirnikiem maszyny elektrycznej. Trzeba jednak zauważyć, że wał korbowy jest wyizolowany akustycznie od otoczenia kadłubem silnika i miską olejową, a więc duża amplituda (om[1] – rys. 7) nie oznacza automatycznie znacznego natężenia hałasu generowanego przez silnik spalinowy.

W dotychczasowych rozważaniach analizowano przeciętne warunki eksploatacji silnika samochodu osobowego. Te warunki to: prędkość obrotowa wynosząca 3500 obr./min oraz 50% obciążenie w stosunku do maksymalnego momentu obrotowego, jaki może generować silnik. Jak już wspomniano, problemy drgań wywołane zmiennością momentu generowanego przez silnik spalinowy są trudniejsze do opanowania dla warunków zbliżonych do biegu jałowego. Na kolejnych dwóch rysunkach przedstawiono przebiegi momentów i prędkości obrotowych dla 10% obciążenia silnika spalinowego i prędkości obrotowej wynoszącej 900 obr./min w przypadku zastosowania trójmasowego koła zamachowego.

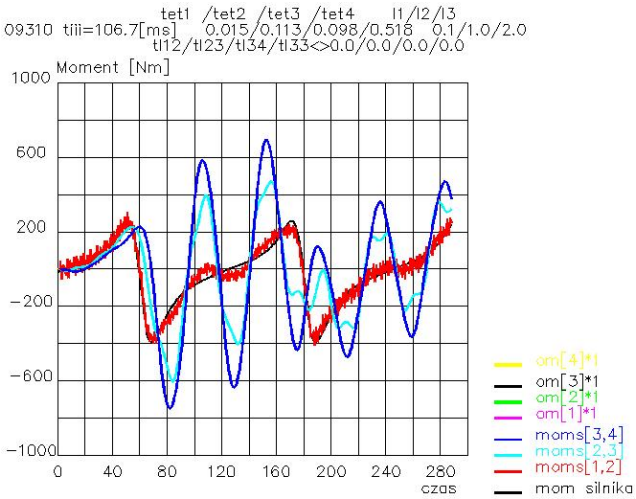
Analogiczne przebiegi w przypadku korekcji momentu za pomocą maszyny elektrycznej w układach hybrydowych przedstawiono na rys. 10 i 11.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 7. Przebieg chwilowej prędkości obrotowej w układzie przeniesienia napędu silnika 3-cylindrowego sprzężonego z maszyną elektryczną, której wirnik zastępuje koło zamachowe Θ_2 – rys. 3; om[1] – dla bezwładności Θ_1 – zgodnie z rys. 3, om[2] – dla bezwładności Θ_2, om[3] – dla bezwładności Θ_3, om[4] – dla bezwładności Θ_4

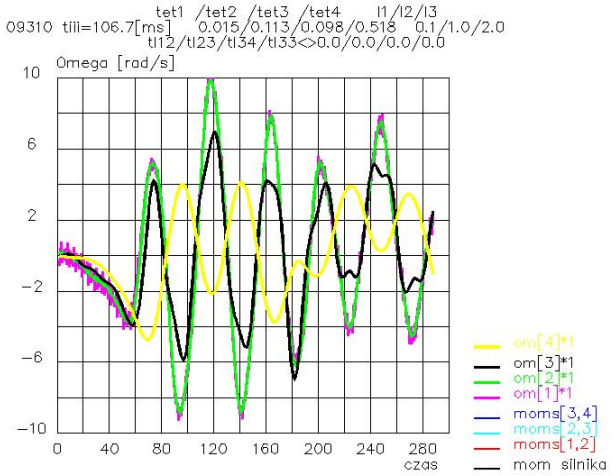
Fig. 7. Course of rotational speed momentary value in 3-cylinder engine to electric machine drive train where rotor Θ_2 replaces flywheel; om[1] for Θ_1 inertia, om[2] for Θ_2 inertia, om[3] for Θ_3 inertia, om[4] for Θ_4 inertia according to Fig. 3



Rys. 8. Przebieg momentu w układzie przeniesienia napędu silnika 3-cylindrowego dla warunków zbliżonych do biegu jałowego; moms[1, 2] – na odcinku L_{12} – zgodnie z rys. 3, moms[2, 3] – na odcinku L_{23}, moms[3, 4] – na odcinku L_{34}

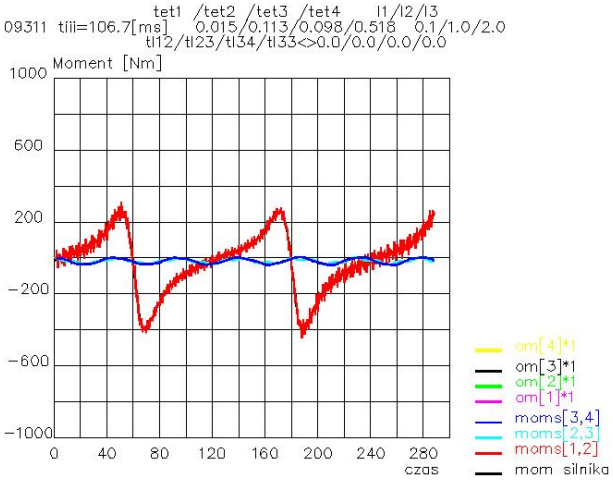
Fig. 8. Course of torque in 3-cylinder engine to electric machine drive train for conditions as for idle run; section L_{12} – moms[1, 2], section L_{23} – moms[2, 3], section L_{34} – moms[3, 4] (as in Fig. 3)

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 9. Przebieg chwilowej prędkości obrotowej w układzie przeniesienia napędu silnika 3-cylindrowego dla warunków zbliżonych do biegu jałowego; om[1] – dla bezwładności Θ_1 – zgodnie z rys. 3, om[2] – dla bezwładności Θ_2, om[3] – dla bezwładności Θ_3, om[4] – dla bezwładności Θ_4

Fig. 9. Course of rotational speed momentary value in 3-cylinder engine to electric machine drive train for conditions as for idle run; om[1] for Θ_1 inertia, om[2] for Θ_2 inertia, om[3] for Θ_3 inertia, om [4] for Θ_4 inertia according to Fig. 3



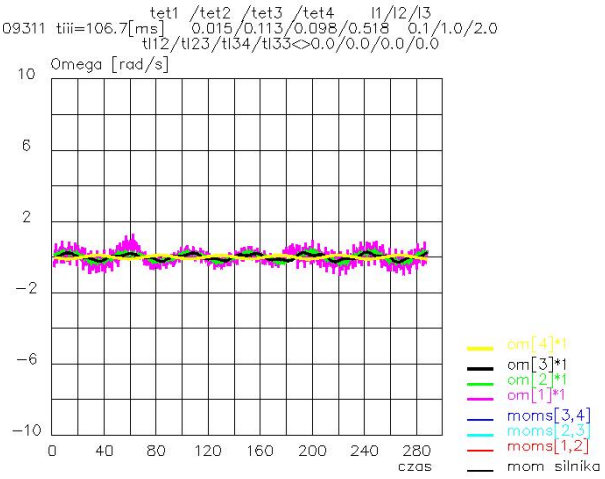
Rys. 10. Przebieg momentu w układzie przeniesienia napędu silnika 3-cylindrowego sprzężonego z maszyną elektryczną, której wirnik zastępuje koło zamachowe Θ_2 – rys. 3 dla warunków zbliżonych do biegu jałowego; moms[1, 2] – na odcinku L_{12} – zgodnie z rys. 3, moms[2, 3] – na odcinku L_{23}, moms[3, 4] – na odcinku L_{34}

Fig. 10. Course of rotational speed momentary value in 3-cylinder engine to electric machine drive train where rotor Θ_2 replaces flywheel for conditions as for idle run; section L_{12} – moms[1, 2], section L_{23} – moms[2, 3], section L_{34} – moms[3, 4] (as in Fig. 3)

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Porównując przebiegi na rys. 8 i 10 oraz 9 i 11, można zauważyć praktycznie wyeliminowanie istotnych wahań zarówno momentu sprzężenia, jak i chwilowych prędkości obrotowych wału przekazującego moment na odbiornik mocy.

Symulacje przeprowadzono, stosując opisane w literaturze [4, 5] procedury programów komputerowych. Główne parametry przyjęte do symulacji zestawiono symbolicznie powyżej wykresów zamieszczonych w artykule. Przyjęto m.in.: $\Theta_1 = 0{,}015$ kgm^2, $\Theta_2 = 0{,}113$ kgm^2, $\Theta_3 = 0{,}098$ kgm^2, $\Theta_4 = 0{,}518$ kgm^2 oraz $L_{12} = 0{,}14$ m, $L_{23} = 1{,}0$ m, $L_{34} = 2{,}0$ m. W symulacjach nie uwzględniono tłumienia, stąd należy przyjąć, że rzeczywiste amplitudy wahań zarówno momentów, jak i prędkości obrotowych będą mniejsze niż to wynika z symulacji komputerowych.



Rys. 11. Przebieg chwilowej prędkości obrotowej w układzie przeniesienia napędu silnika 3-cylindrowego sprzężonego z maszyną elektryczną, której wirnik zastępuje koło zamachowe Θ_2 – rys. 3, dla warunków zbliżonych do biegu jałowego; om[1] – dla bezwładności Θ_1 – zgodnie z rys. 3, om[2] – dla bezwładności Θ_2, om[3] – dla bezwładności Θ_3, om[4] – dla bezwładności Θ_4

Fig. 11. Course of rotational speed momentary value in 3-cylinder engine to electric machine drive train where rotor Θ_2 replaces flywheel for conditions as for idle run; om[1] for Θ_1 inertia, om[2] for Θ_2 inertia, om[3] for Θ_3 inertia, om[4] for Θ_4 inertia according to Fig. 3

5. Wnioski

1. W tłokowych silnikach spalinowych można w sposób radykalny ograniczyć wahania momentu przekazywanego na odbiornik mocy przez zastąpienie koła zamachowego wirnikiem maszyny elektrycznej generującej moment dodatni w trakcie suwów pomocniczych silnika spalinowego oraz moment ujemny w suwach rozprężania.
2. Dla uzyskania równomiernego biegu zespołu silnika spalinowego bardzo dobrym rozwiązaniem jest generowanie przez maszynę elektryczną momentu negatywowego w stosunku do momentu wywoływanego przez silnik spalinowy zmniejszonego o moment średni.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

3. Oddziaływanie momentem negatywowym na zespół silnika spalinowego prowadzi do zapewnienia równomiernego biegu zarówno w warunkach przeciętnych parametrów jego użytkowania, jak i w warunkach zbliżonych do biegu jałowego.

Literatura

[1] Braess H.H., Seiffert U., *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden 2003.

[2] Iskra A., *Uwarunkowania techniczne stosowania paliw odnawialnych do napędu samochodów*, V Międzynarodowe Sympozjum „Polacy Razem" – Energia odnawialna w kontekście ochrony Środowiska, Verein Polnischen Ingenieurinnen und Ingenieure in Österreich, Wien 16–18.11.2006.

[3] Iskra A., *Transformacja wyników pomiaru momentu sprzęgającego silnik z odbiornikiem mocy do momentu rzeczywistego. Transformation of the Engine-to-receiver Coupling Torque Measurement Results to the Actual Value of Torque*, Pomiary Automatyka Kontrola 5/2006, 41-45.

[4] Iskra A., *P07-C001. Redukcja prędkości obrotowej biegu jałowego z wykorzystaniem dwubezwładnościowych kół zamachowych*, Application of Double Inertia Flying Wheels for Reduction of Idle Speed, II Kongres Polskiego Towarzystwa Naukowego Silników Spalinowych, 21–23.05.2007.

[5] Iskra A., *Problems with Determination of Instantaneous Values of Torque Generated by a Combustion Engine. Problemy określenia chwilowych wartości momentu generowanego przez silnik spalinowy*, Journal of KONES 2006, European Science of Powertrain Publication, Warsaw 2006, Warszawa–Lublin–Nałęczów, 10–13.09.2006, 125-131.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ