

POSSIBILITIES OF REDUCTION IN VIBRATIONS OF HYBRID DRIVE TRAIN

Antoni Iskra

*Politechnika Poznańska
Piotrowo 3, 60-965 Poznań
tel.: +48 061 6652511, fax: +48 061 662514
e-mail: Antoni.Iskra@put.poznan.pl*

Abstract

A basic disadvantage of reciprocating machines is a variable torque. Despite the number of cylinders the maximum value of torque usually exceeds many times the torque mean value which requires the use of reinforced parts of drive train that eventually leads to an increase in engine mass and cost. This paper presents a way to limit the torque amplitude in drive train of hybrid units. Such unit consists of a combustion engine and electrical motor. A development of hybrid drive trains for passenger cars observed in recent years facilitates the application of electrical motor to take over a part of torque at the stroke of work and return the energy at so called auxiliary strokes without a considerable increase in car production costs. Such process makes vibrations damping that so far was carried out by the viscous dampers or multi mass flying wheels. The use of hybrid electrical motor for instant reaction to torque's surplus or shortage causes a number of problems analyzed in following paper. After a thorough analysis of different reactions of hybrid electrical motor to variable torque it was revealed that the level of drive train speed irregularity decreases when the auxiliary torque of electrical motor is close to the mean torque of the combustion engine. Finally, a course of coupling torque in drive train has been presented for the case of hybrid damping and without such damping.

Keywords: *transport, powertrain, hybrid powertrain, vibration attenuation*

MOŻLIWOŚCI REDUKCJI DRGAŃ ZESPOŁU NAPĘDOWEGO W UKŁADACH HYBRYDOWYCH

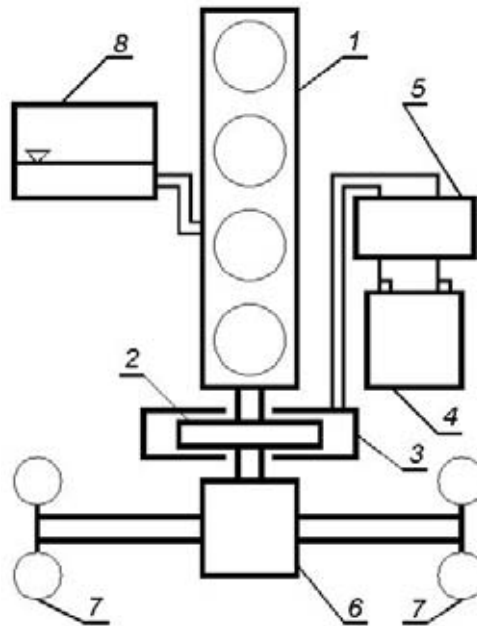
Streszczenie

Podstawową wadą tłokowych silników spalinowych jest zmienność momentu obrotowego. Niezależnie od liczby cylindrów maksymalna wartość momentu obrotowego zwykle wielokrotnie przekracza moment średni co zmusza do stosowania odpowiednio wzmocnionych elementów przeniesienia napędu zwiększając masę i koszt produkcji silnika. W artykule zostanie przedstawiony sposób ograniczenia amplitudy momentu w elementach przeniesienia napędu w jednostkach hybrydowych. Taką jednostkę tworzy tłokowy silnik spalinowy i silnik elektryczny. Obserwowany w ostatnich latach rozwój jednostek hybrydowych w samochodach osobowych pozwala bez istotnego zwiększenia kosztów produkcji samochodu wykorzystać silnik elektryczny do przejmowania części momentu w suwie rozprężania i oddawania energii w tzw. suwach pomocniczych. Proces taki stanowi tłumienie drgań, które dotychczas było realizowane za pomocą tłumików wiskotycznych lub wielomasowych kół zamachowych. Wykorzystanie hybrydowego silnika elektrycznego do bezzwłocznej reakcji na moment nadwyżkowy lub niedobór momentu rodzi szereg problemów, które są przedmiotem rozważań w artykule. Po przeanalizowaniu różnorodnych sposobów reagowania hybrydowej maszyny elektrycznej na zmieniający się moment wykazano, że znacznie zmniejsza się stopień nierównomierności biegu zespołu napędowego jeśli moment oddziaływania dodatniego lub ujemnego maszyny elektrycznej jest równy średniemu momentowi tłokowego silnika spalinowego. W końcowej części referatu przedstawiono przebieg momentu sprzężenia w łańcuchu przeniesienia napędu bez tłumienia hybrydowego oraz z zastosowaniem takiego tłumienia.

Słowa kluczowe: *napęd hybrydowy, tłumienie drgań*

1. Wstęp

Tłokowe silniki spalinowe prawie w 100% stanowią obecnie jednostki o 3 do 6 cylindrach najczęściej ustawionych rzędowo i jedynie silniki 6 cylindrowe bywają produkowane jako jednostki widlaste. Najprostszym sposobem ograniczania amplitudy momentu generowanego przez silnik jest stosowanie koła zamachowego o odpowiednio dużym momencie bezwładności. Niestety koło zamachowe utrudnia zmianę prędkości obrotowej silnika również wtedy, kiedy użytkownikowi zależy na jak najszybszym zwiększeniu prędkości, a więc w trakcie przyspieszania samochodu. Częściowo problem można rozwiązać stosując dwu- a nawet trójbezwładnościowe koła zamachowe, ale wyniki nie są zadowalające w całym obszarze użytkowania silnika. Koło zamachowe - gromadząc energię w postaci kinetycznej – daje niestety ograniczone możliwości jej regulacji. Znacznie lepszym sposobem jest gromadzenie energii w postaci elektrycznej. Taką możliwość daje układ hybrydowy, którego schemat przedstawiono na rys. 1 [2].



Rys. 1. Schemat napędu hybrydowego samochodu; 1 - silnik spalinowy, 2 – koło zamachowe stanowiące równocześnie wirnik maszyny elektrycznej, 3 - maszyna elektryczna mogąca pełnić funkcję silnika lub prądnicy, 4 - akumulator energii elektrycznej, 5 - sterowanie sprzężeniem maszyny elektrycznej z akumulatorem energii elektrycznej, 6 – przekładnia główna, 7 – koła samochodu, 8 - zbiornik paliwa

Fig. 1. Scheme of car hybrid drive; 1 – combustion engine, 2 – flying wheel (rotor of electrical machine), 3 – motor/dynamometer electrical machine, 4 – accumulator of electric energy, 5 – electrical machine to electrical energy accumulator coupling control, 6 – main gear, 7 – car wheels, 8 – fuel container

Koło zamachowe 2, stanowiące równocześnie wirnik maszyny elektrycznej, służy przede wszystkim do przejmowania energii w trakcie kiedy pojazd hamuje, a jako silnik elektryczny napędza pojazd w trakcie przyspieszania. W przypadku odpowiednio pojemnych akumulatorów 4 – rys.1 – silnik elektryczny 3 może również w dłuższym czasie napędzać pojazd np. w ruchu miejskim. Ujmując problem w wartościach przekazywanej energii można określić dotychczasową rolę maszyny elektrycznej w układach hybrydowych jako:

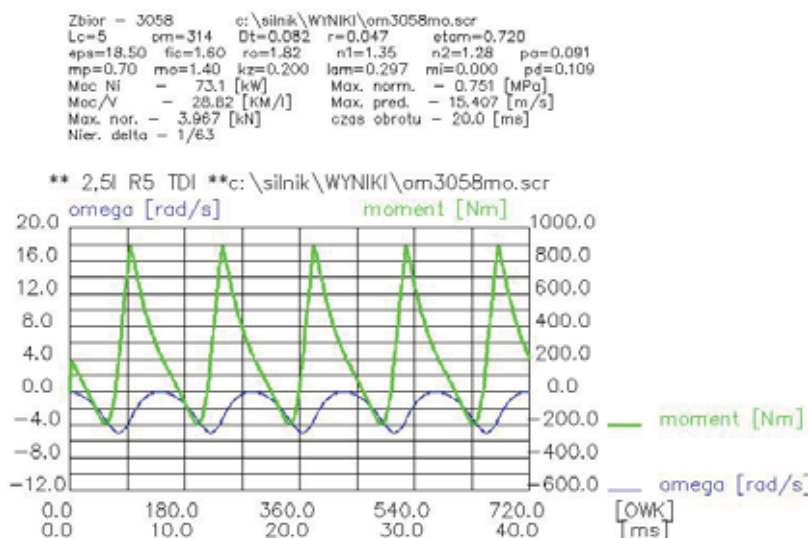
- 1- doraźną, kiedy energia przejmowana w trakcie hamowania i oddawana w trakcie przyspieszania nie przekracza wartości 1 kWh,
- 2- napędową, kiedy w sposób nieprzerwany energia napędu przekracza kilkanaście kWh.

Nowa rola maszyny elektrycznej będzie polegała na przejmowaniu i oddawaniu energii o wartościach tysięcznych części kWh ale w bardzo krótkim czasie kilku ms. Oznacza to że niewielka energia przepływa między silnikiem spalinowym a elektrycznym z dużą mocą. Im efekt wyrównywania amplitud prędkości obrotowej ma być większy tym większa moc musi krążyć między silnikiem spalinowym a elektrycznym. W skrajnym przypadku może to być moc znacznie

większa niż moc nominalna silnika spalinowego. Problemy jakich należy się spodziewać to nadążanie układu za zmieniającym się momentem generowanym przez silnik spalinowy oraz duża moc przejmowana a następnie oddawana w celu wyrównania prędkości obrotowej elementów napędu pojazdu.

2. Stopień nierównomierności biegu silników z pojedynczym kołem zamachowym

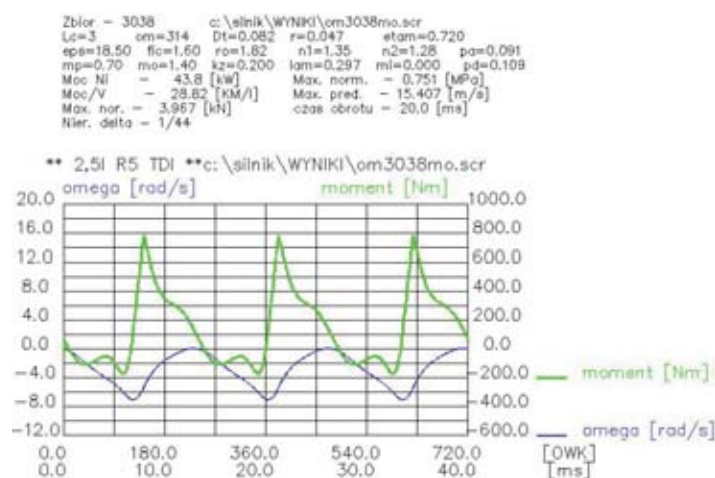
Zwykle silnik o większej liczbie cylindrów cechuje się lepszą równomiernością biegu. Niestety do tej zasady nie stosuje się silnik 5 cylindrowy. Jest to szczególnie istotne, gdyż silnik 5 cylindrowy jest jednostką, która mieści się poprzecznie do osi samochodu i z tego powodu wielu producentów decyduje się wśród gamy produkowanych silników proponować również tego typu napęd. Jest to zwykle napęd samochodów wyższej klasy danego producenta. Niestety w silniku 5 cylindrowym niekorzystnie sumują się momenty wywołane siłami gazowymi i siłami bezwładności. Skutek jest taki jak to przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Przebieg zmian chwilowej prędkości kątowej silnika 5 cylindrowego – linia koloru niebieskiego- oraz moment wywołujący zmiany prędkości kątowej – linia zielona

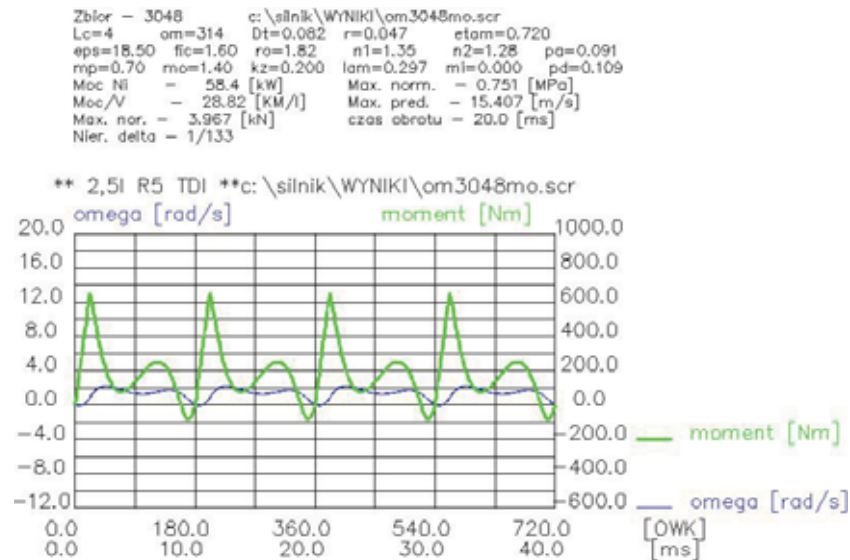
Fig. 2. Course of momentary rotational speed variations of a 5-cylinder engine – blue line, and speed variation generating torque – green line

Dla porównania na rys. 3 przedstawiono przebieg momentu generowanego w silniku 3 cylindrowym a na rys. 4 – w silniku 4 cylindrowym.



Rys. 3. Przebieg zmian chwilowej prędkości kątowej silnika 3 cylindrowego – linia koloru niebieskiego- oraz moment wywołujący zmiany prędkości kątowej – linia zielona

Fig. 3. Course of momentary rotational speed variations of a 3-cylinder engine – blue line, and speed variation generating torque – green line



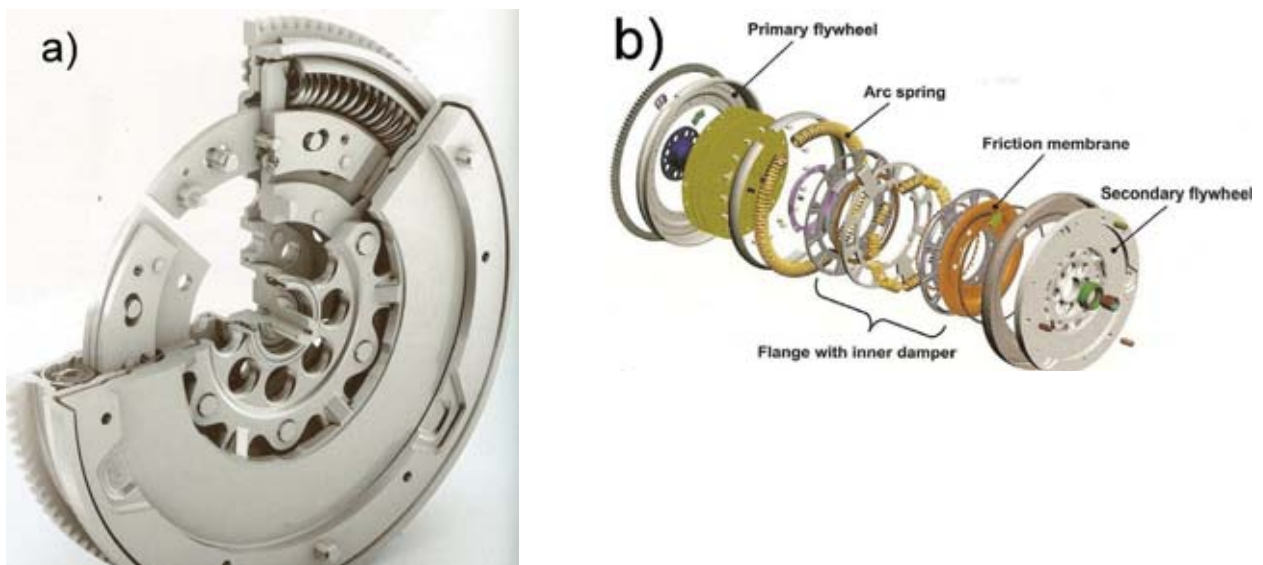
Rys. 4. Przebieg zmian chwilowej prędkości kątowej silnika 4 cylindrowego – linia koloru niebieskiego- oraz moment wywołujący zmiany prędkości kątowej – linia zielona

Fig. 4. Course of momentary rotational speed variations of a 4-cylinder engine – blue line, and speed variation generating torque – green line

Należy podkreślić, że we wszystkich przypadkach parametry pojedynczego cylindra są takie same. Jak łatwo zauważyć stopień nierównomierności biegu δ dla silnika 4 cylindrowego jest zdecydowanie najlepszy gdyż wynosi $1/133$. Dla silnika 5 cylindrowego $\delta = 1/63$, która to wartość jest raczej zbliżona do wartości $\delta = 1/44$ jaką wykazuje silnik 3 cylindrowy. Powyżej wykresów na rys. 3, 4 i 5 naniesiono podstawowe parametry, dla jakich dokonano obliczeń.

3. Metody ograniczania wahan momentu sprzężenia silnika tłokowego z odbiornikiem mocy

Podstawową wadę silników 5 cylindrowych, jaką jest niekorzystny stopień nierównomierności biegu, ogranicza się stosując zespolone koła zamachowe. Przekrój takiego koła przedstawiono na rys. 5 [1].



Rys. 5. Przekrój dwumasowego koła zamachowego zespolonego – a) oraz części składowe koła – b)

Fig. 5. Cross-section of a two-mass aggregate flying wheel (a) and its parts (b)

Stosowanie kół zamachowych dwumasowych daje możliwość zdecydowanej poprawy parametrów przeniesienia napędu w wybranych parametrach pracy silnika. Poza obszarem, dla którego koło zamachowe zostało zaprojektowane jego skuteczność znacznie się obniża. Stąd pomysł aby do zmniejszenia amplitudy zmian momentu przeniesienia napędu – i równocześnie amplitudy zmian prędkości kątowych wykorzystać maszynę elektryczną będącą częścią napędu hybrydowego. Takie rozwiązanie rodzi szereg problemów realizacyjnych, jednak problemem pierwotnym jest przyjęcie funkcji, według której maszyna elektryczna przeciwdziała chwilowym zmianom prędkości obrotowej. Najlepszym rozwiązaniem byłoby bezzwłoczne oddziaływanie maszyny elektrycznej momentem równoważnym różnicy momentu chwilowego generowanego przez silnik spalinowy a momentem średnim. Takie oddziaływanie musiałoby mieć oczywiście przeciwny zwrot momentu oddziaływania do momentu generowanego przez silnik spalinowy.

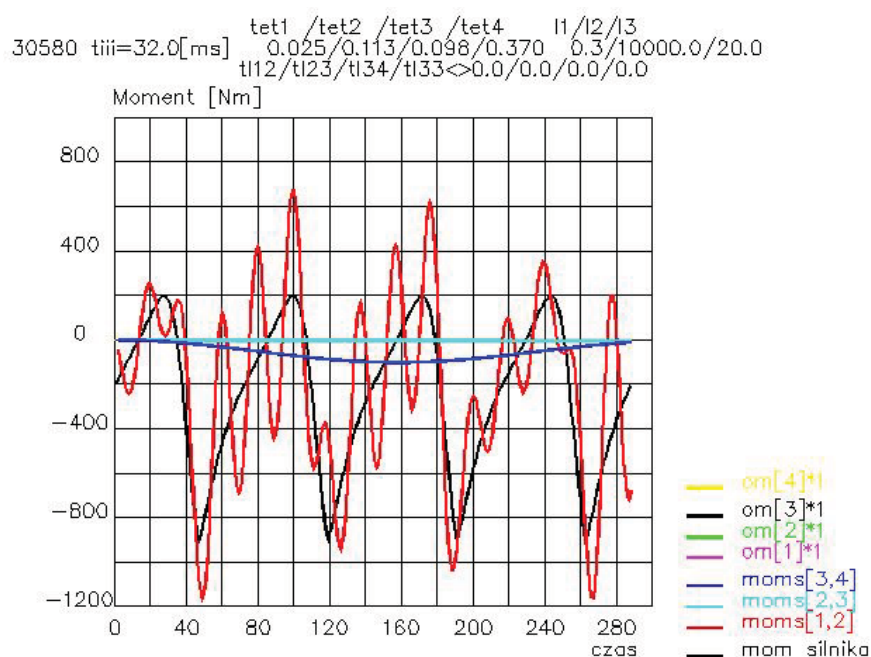
Podstawową wadą takiego założenia jest bardzo duża moc chwilowa jaką musiałaby generować maszyna elektryczna w chwili wymaganego maksymalnego momentu przeciwdziałania. W układzie hybrydowym silnik spalinowy 5 cylindrowy musiałaby współpracować z maszyną elektryczną o mocy około 4 razy większą niż moc silnika spalinowego. Takie rozwiązanie znacznie zwiększyłoby masę układu napędowego hybrydowego i co równie ważne koszty produkcji stałyby się nieopłacalne.

Aktualnie autorzy prowadzą badania możliwości technicznych nadążania za zmieniającym się momentem silnika spalinowego układu sprzęgającego silnik z maszyną elektryczną – poz. 5 na rys.1. Dotychczasowe wyniki wskazują jednak, że czas zwłoki w oddziaływaniu maszyny elektrycznej na zmieniający się moment silnika spalinowego jest porównywalny z czasem występowania nadwyżki momentu w suwie rozprężania.

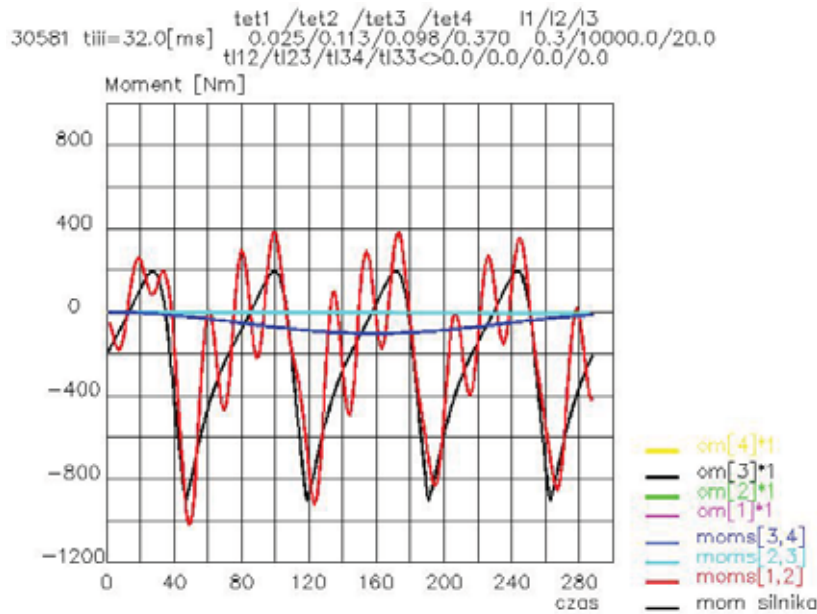
Z dotychczasowych wyników badań wynika, że najlepsze rezultaty można uzyskać przyjmując zasadę:

Maszyna elektryczna hamuje momentem o wartości równej momentowi średniemu generowanemu przez silnik w okresie nadwyżki momentu w suwie rozprężania,

Maszyna elektryczna napędza układ takim samym momentem w okresie kiedy prędkość obrotowa napędu jest mniejsza od prędkości średniej. Wyniki takiego oddziaływania ilustrują rys. 6 i 7.



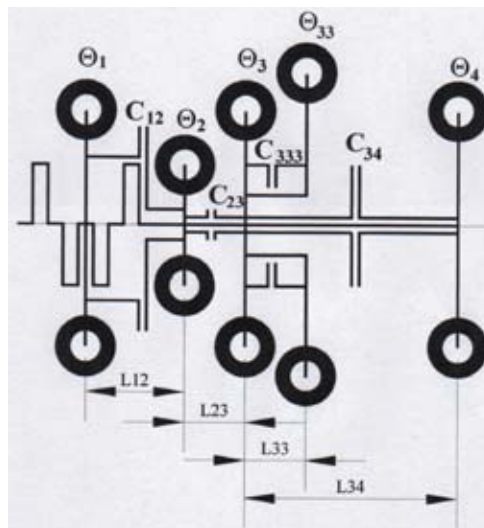
Rys. 6. Momenty sprzężenia w łańcuchu przeniesienia napędu od silnika spalinowego TDI R5 do odbiornika mocy stanowiącego asynchroniczną maszynę elektryczną; układ wyposażony w jednomasowe koło zamachowe
 Fig. 6. Coupling torques in drive train from the TDI R5 combustion engine to power receiver (asynchronous electrical machine); assembly equipped with a single mass flying wheel



Rys. 7. Momenty sprzężenia w łańcuchu przeniesienia napędu od silnika spalinowego TDI R5 do odbiornika mocy stanowiącego asynchroniczną maszynę elektryczną; układ wyposażony w maszynę elektryczną hybrydową, tłumiącą wachania prędkości obrotowej

Fig. 7. Coupling torques in drive train from the TDI R5 combustion engine to power receiver (asynchronous electrical machine); assembly equipped with a hybrid electrical machine damping the speed fluctuations

Schemat układu przeniesienia napędu przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Model zastępczy łańcucha przeniesienia napędu od wału korbowego o momencie zastępczym Θ_1 do wirnika hamulca elektrycznego o momencie Θ_4

Fig. 8. Substitute model of drive train from crankshaft of Θ_1 inertia torque to electrical machine rotor of Θ_4 inertia torque

Zgodnie z rys. 8 przyjęto następujące oznaczenia parametrów podstawowych elementów w łańcuchu przeniesienia napędu:

- wał korbowy o momencie zredukowanym Θ_1 , długości zredukowanej L_{12} oraz tłumieniu C_{12} ,
- koło zamachowe o momencie bezwładności Θ_2 - sztywno sprzężone z wałem korbowym, długości zredukowanej L_{12} oraz tłumieniu C_{12} , a z drugiej strony przekazującej moment na dodatkowe koło zamachowe o momencie bezwładności Θ_3 ,
- wirnik maszyny elektrycznej o masowym momencie bezwładności Θ_4 sprzężonej z kołem zamachowym przegubowym wałem o długości zastępczej L_{34} .

Przebiegi momentów na rys. 6 i 7 dotyczą początkowej fazy rozruchu zespołu silnik spalinowy – maszyna hamująca. Praca wymaga dalszych badań w pozostałych przypadkach, a więc w obszarze eksploatacyjnego użytkowania silnika oraz w chwili wyłączenia zespołu z ruchu. Tego typu badania zostały opublikowane m.in. w pracy [1] dotyczącej koła zamachowego dwumasowego. Kierunki badań niniejszej pracy i badań opublikowanych w pracy [1] różnią się tym, że układ hybrydowy daje możliwość dostosowania się do każdego warunków użytkowania silnika. Koło dwumasowe jest co prawda elementem o wyrafinowanej charakterystyce, ale zastosowana charakterystyka nie może być na bieżąco modyfikowana w zależności od trudnych do przewidzenia warunków eksploatacji. Elastyczne reagowanie nawet na nietypowe zachowania kierowcy pojazdu daje zaproponowane rozwiązanie w niniejszym artykule poszerzające funkcje hybrydowych układów napędowych pojazdu.

4. Wnioski

1. Coraz szerzej stosowane napędy hybrydowe w samochodach osobowych dają możliwość ich dodatkowego wykorzystania do łagodzenia drgań w układzie przeniesienia napędu od silnika spalinowego do kół jezdnych pojazdu
2. Wykorzystanie elektrycznej maszyny napędu hybrydowego do łagodzenia drgań w układzie przeniesienia napędu może uwzględniać dowolny sposób użytkowania pojazdu, czego nie umożliwia nawet najbardziej zaawansowane konstrukcyjnie dwumasowe koło zamachowe

Literatura

- [1] Balashov, D., *Simulation bei Drehschwingungsdämpfern*, ATZ 12/2006.
- [2] Iskra, A., *Poprawa stopnia nierównomierności biegu tłokowego silnika spalinowego w układach hybrydowych*, Przegląd Mechaniczny, 2007.

