MODELOWANIE INŻYNIERSKIE ISSN 1896-771X
41, s. 197-204, Gliwice 2011

ZASTOSOWANIE PRZEKŁADNI HYDROKINETYCZNEJ DO REDUKCJI WIBRACJI HYBRYDOWEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO

GABRIEL KOST, ANDRZEJ NIERYCHLOK, WACŁAW BANAŚ

Instytut Automatyzacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania, Politechnika Śląska
e-mail:gabriel.kost@polsl.pl, andrzej.nierychlok@ polsl.pl, waclaw.banas@polsl.pl

Streszczenie. W pracy opisano koncepcję zastosowania przekładni hydrokinetycznej do zredukowania drgań w hybrydowym układzie napędowym pojazdu kołowego. Zastosowanie takiego rozwiązania pozwala na skuteczną eliminację drgań powstałych w czasie przełączania jednostek napędowych lub dołączania maszyny wspomagającej (synergia energii). Także sposób przełączania przy różnych prędkościach obrotowych pozwala na eliminację znacznych drgań powstałych z różnic prędkości obrotowej jednostek napędowych.

1. WSTĘP

Silnik spalinowy charakteryzuje się bardzo nierównomierną pracą. Praca takiego silnika wiąże się z dużymi siłami działającymi w układzie korbowo-tłokowym, które powstają ze spalania mieszanki paliwowo-powietrznej. Spalanie mieszanki powoduje występowanie dużych ciśnień w komorze spalania, co ma bezpośredni wpływ na nierównomierną pracę silnika spalinowego, w szczególności przy niskich prędkościach obrotowych. Obecnie każdy produkowany silnik spalinowy powinien charakteryzować się niezawodnością i długą żywotnością. By sprostać temu zadaniu, prowadzi się badania optymalizacyjne dla poszczególnych części silnika. Ponieważ żywotność jak i niezawodność silnika spalinowego zależy w głównej mierze od częstości i amplitudy drgań skrętnych wału korbowego, konieczne jest prowadzenie badań optymalizacyjnych tłumików drgań skrętnych. Celem takiej optymalizacji jest dobór takich parametrów geometrycznych i fizycznych, które przyczynią się do zmniejszenia drgań skrętnych wału. Dobrze dobrany tłumik umożliwia obniżenie amplitudy drgań nawet 10-krotnie w stosunku do drgań wału korbowego bez tłumika [4,5] oraz zwiększa moc silnika oddawaną na koła pojazdu o ok. 1,2%.

Można wyróżnić dwie podstawowe siły działające na układ korbowy silnika, powodujące drgania skrętne wału korbowego, a mianowicie:

- siły ciśnienia gazów powstające w procesie spalania mieszanki,
- siły bezwładności pochodzące od mas w ruchu obrotowym i w ruchu posuwisto-zwrotnym (siły odśrodkowe, siły posuwiste).

Siły ciśnienia gazów i siły bezwładności zmieniają się okresowo [4,5]. Analizując wykres siły wypadkowej w funkcji kąta obrotu $\varphi(t)$ wału korbowego, dowodzi się, że siły bezwładności najbardziej obciążają układ korbowo-tłokowy w okresie końca sprężania i początkowej fazie rozprężania.

Przykładem stosowania tłumika drgań skrętnych w pojazdach kołowych jest stosowanie w ostatnich latach dwumasowego koła zamachowego, powodującego obniżenie pierwszej harmonicznej z ok. 1200 obr/min do ok. 300 obr/min [4,5]. Stosowanie takiego rozwiązania przyczyniło się do poprawy charakterystyki pracy silnika spalinowego w zakresie niskich prędkości obrotowych oraz znacząco zwiększyło trwałość silnika spalinowego. W pojazdach kołowych z napędem hybrydowym wymagane jest sprzęgło, które może być włączane lub wyłączane bez udziału kierowcy. To układ sterowania ma za zadanie włączyć lub wyłączyć daną jednostkę napędową.

2. SPRZĘGŁA I PRZEKŁADNIE HYDROKINETYCZNE

Sprzęgła i przekładnie hydrokinetyczne obecnie stosowane są w pojazdach kołowych wyposażonych w automatyczną skrzynię biegów. Umożliwia to równą i nie wymagającą ingerencji kierowcy pracę całego układu napędowego. Sprzęgła i przekładnie hydrokinetyczne mimo swoich zalet mają także pewne wady. Dlatego przy doborze i projektowaniu układów napędowych do pojazdów kołowych trzeba przeanalizować zarówno korzyści, jak i wady wynikające z ich stosowania. Sprzęgła hydrokinetyczne charakteryzują się następującymi własnościami korzystnymi [2]:

- podatne związanie wału wejściowego z wyjściowym,
- ograniczenie przenoszenia drgań skrętnych,
- cicha i spokojna praca,
- włączanie i wyłączanie sprzęgła pod pełnym obciążeniem,
- możliwość regulacji prędkości obrotowej na wale wyjściowym bez konieczności zmiany prędkości obrotowej wału wejściowego,
- niewielka masa własna przekładni hydrokinetycznej.

Do wad sprzęgieł hydrokinetycznych należy zaliczyć:

- mniejszą sprawność sprzęgła od sprzęgieł konwencjonalnych,
- większe gabaryty,
- zwłokę czasową potrzebną do wyłączania lub włączania sprzęgła,

Uwzględniając zarówno wady, jak i zalety sprzęgieł i przekładni hydrokinetycznych, ogólnie można wymienić ich następujące zastosowania w pojazdach kołowych [2]:

- jest to element układu napędowego ułatwiający płynne ruszanie i płynny rozbieg pojazdu, nawet w sytuacjach bardzo dużych obciążeń, ruszanie pojazdem kołowym z maksymalnym momentem napędowym,
- urządzenie zabezpieczające układ napędowy przed nagłym przeciążeniem i przed uszkodzeniem przy nagłym zatrzymaniu pojazdu; sprzęgło hydrokinetyczne podnosi trwałość elementów układów napędowych oraz silnika spalinowego, ułatwia również zachowanie płynnej jazdy pojazdu kołowego bez szarpnięć podczas zmiany biegu,
- urządzenie ułatwiające precyzyjne sterowanie prędkością pojazdu, prędkością obrotową wału wyjściowego,
- urządzenie często stosowane do wyłączania i włączania napędu,
- urządzenie tłumiące drgania skrętne.

3. SPRZĘGŁA HYDROKINETYCZNE A POJAZDY HYBRYDOWE

W przypadku modelowania przekładni hydrokinetycznej w oprogramowaniu MatLAB/Simulink konieczne jest sporządzenie modelu matematycznego takiej przekładni.

Poniżej przedstawiono równania ruchu pojazdu kołowego wyposażonego w sprzęgło cierne oraz w przekładnię hydrokinetyczną.

Równanie ruchu pojazdu kołowego wyposażonego w idealne sprzęgło cierne dla ruchu jednostajnego z małą prędkością można zapisać w postaci [1]:

$$\frac{M \cdot i_p \cdot \eta_m}{r_k} = \psi \cdot G \tag{1}$$

gdzie:
M – moment napędowy, i_p – przełożenie całkowite, η_m – sprawność mechaniczna, r_k – promień koła, ψ – współczynnik oporu drogi, G – ciężar samochodu.

Przy wzroście momentu silnika o wartości M_1 pojazd uzyska przyspieszenie a

$$\frac{(M+M_1) \cdot i_p \cdot \eta_m}{r_k} = \psi \cdot G + \delta \frac{G}{g} \cdot a \tag{2}$$

gdzie:
δ – współczynnik masy pozornej pojazdu kołowego,

$$\delta = 1 + \frac{g \sum I_k}{G \cdot r_k^2} + \frac{I_S \cdot i_p^2 \cdot \eta_m \cdot g}{G \cdot r_k^2} \tag{3}$$

gdzie:
I_k – moment bezwładności kół napędowych pojazdu i związanych z nimi elementów,
I_S – moment bezwładności mas obrotowych związanych z wałem korbowym.

Wyliczając przyśpieszenie a, traktuje się je jako miarę wielkości przyrostu siły napędowej na kołach pojazdu, przy wzroście momentu o wartość M_1

$$a = \frac{M_1 \cdot i_p \cdot \eta_m \cdot g}{r_k \cdot G} \tag{4}$$

Wartość przyśpieszenia można traktować jako wielkość przyrostu siły napędowej na kołach pojazdu. Siłę tę można obliczyć z następującej zależności:

$$F_d = \frac{G}{g} \cdot a \tag{5}$$

Uwzględniając sprzęgło hydrokinetyczne, równanie ruchu wygląda następująco

$$\frac{M \cdot i_p \cdot \eta_m}{r_k} = \delta \frac{G}{g} \cdot \frac{dv}{dt} + I_1 \frac{i_p \cdot \eta_m}{r_k} \cdot \frac{d\omega_1}{dt} + I_2 \frac{i_p \cdot \eta_m}{r_k} \cdot \frac{d\omega_2}{dt} + \sum I_k \frac{d\omega_k}{dt} \tag{6}$$

$$\delta = 1 + \frac{g \sum I_k}{G \cdot r_k^2} + \frac{I_S \cdot i_p^2 \cdot \eta_m \cdot g}{G \cdot r_k^2} \left[(J_1 + J_T) \frac{d\omega_1}{d\omega_2} + J_2 \right] \tag{7}$$

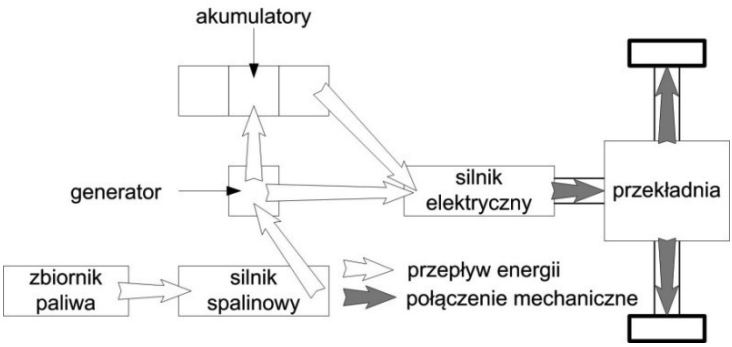
gdzie:
I_k – moment bezwładności obracających się części związanych z silnikiem, zredukowany do osi wału korbowego,
I_S – moment bezwładności części sprzęgła związanych z wałem napędowym pojazdu,
ω_1 – prędkość kątowa części napędzającej sprzęgła hydrokinetycznego,
ω_2 – prędkość kątowa części napędzanej sprzęgła hydrokinetycznego.

Porównując zależności (1) i (6) oraz (3) i (7) można wyciągnąć wniosek, że dla przypadku z przekładnią hydrokinetyczną wartość współczynnika masy pozornej δ nie jest stała i zależy w dużym stopniu od wartości pochodnej $\frac{d\omega_1}{d\omega_2}$. Wielkość tej pochodnej może przybierać rozmaite wartości od nieskończoności do zera, a nawet w niektórych przypadkach wartości ujemne [1,2]. W związku z niestałą wartością δ konieczne jest zbadanie przyśpieszenia pojazdu w funkcji czasu.

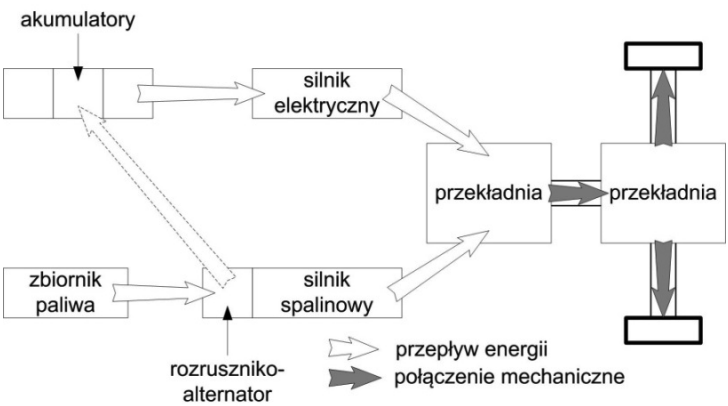
3.1. Pojazd hybrydowy – praca własna

Pojazdy kołowe o napędzie hybrydowym są to pojazdy, które posiadają dwa osobne i niezależne źródła energii (silniki napędowe, najczęściej spalinowy i elektryczny). Ze względu na połączenie mechaniczne jednostek napędowych pojazdy hybrydowe dzielimy na (rys 1,2):

- o połączeniu szeregowym,
- o połączeniu równoległym.



Rys. 10. Pojazd hybrydowy o strukturze szeregowej [3]



Rys. 11. Pojazd hybrydowy o strukturze równoległej [3]

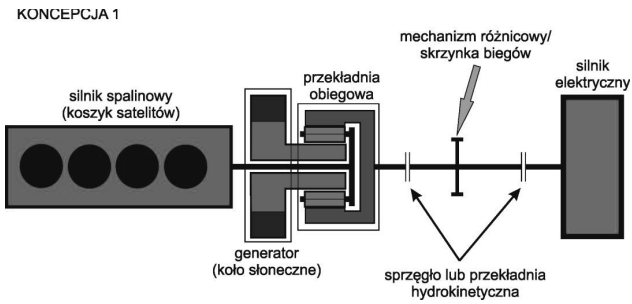
Wybór połączenia mechanicznego silników napędowych jest kluczowym zagadnieniem w projektowaniu pojazdu hybrydowego. Połączenie szeregowe charakteryzuje się praktycznie ciągłą i nieprzerwaną pracą jednostki spalinowej napędzającej generator elektryczny. Silnik elektryczny w takim przypadku wyłącznie napędza pojazd kołowy. Połączenie równoległe to sposób na wzajemną pracę jednostek napędowych mogących napędzać pojazd kołowy. Wzajemnie oddawanie mocy do kół pojazdu nazywa się synergią. Takie połączenie ma wiele zalet:

- praca na jednostce elektrycznej lub spalinowej,
- wspomaganie jednego silnika drugim,
- możliwość wyłączenia silnika spalinowego.

Jednakże wymienić należy także wady, które to w większym lub mniejszym stopniu wpływają niekorzystnie na układ napędowy. Włączanie jednostki spalinowej oraz praca na

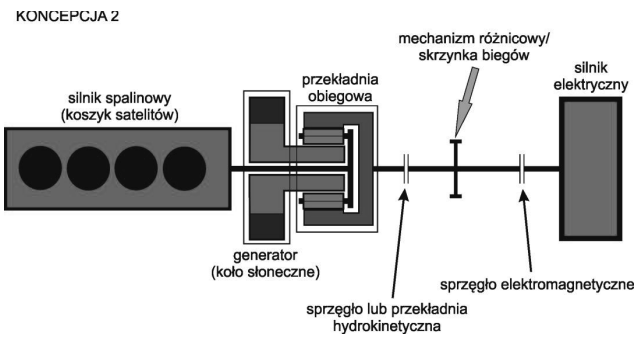
wolnych obrotach powoduje powstawanie drgań skrętnych, niekorzystnie wpływających na komfort podróżujących, jak również na sam układ napędowy. Dlatego postanowiono w pracy przybliżyć problem drgań skrętnych wału pochodzących od silnika spalinowego i metodę ich tłumienia. Do analizy wykorzystano środowisko MatLAB/Simulink, w którym zbudowano model pojazdu hybrydowego wraz z pełnym procesem sterowania i kontroli takiego pojazdu.

Sprzęgło hydrokinetyczne możemy zainstalować przy każdej jednostce napędowej, zarówno po stronie silnika spalinowego, jak i i silnika elektrycznego (rys. 3).



Rys. 12. Koncepcja pierwsza; sprzęgło hydrokinetyczne zainstalowane jest po obu stronach jednostek napędowych

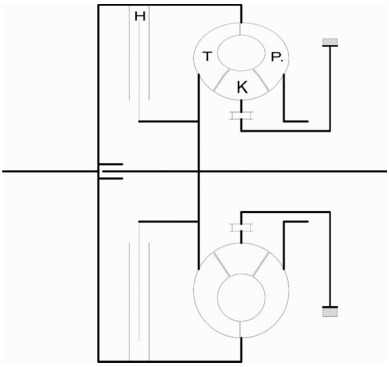
Stosowanie takiego rozwiązania wiąże się ze zwiększeniem kosztów i mniejszą ogólną sprawnością układu napędowego. Silnik elektryczny wraz z dobrze dobranym układem sterowania charakteryzuje się dużo mniejszą amplitudą drgań skrętnych wału, dlatego po stronie silnika elektrycznego w celu zmniejszenia kosztów oraz poprawy sprawności ogólnej zastosowano sprzęgło elektromagnetyczne (rys. 4).



Rys. 13. Koncepcja druga; sprzęgło hydrokinetyczne zainstalowane jest tylko po stronie silnika spalinowego

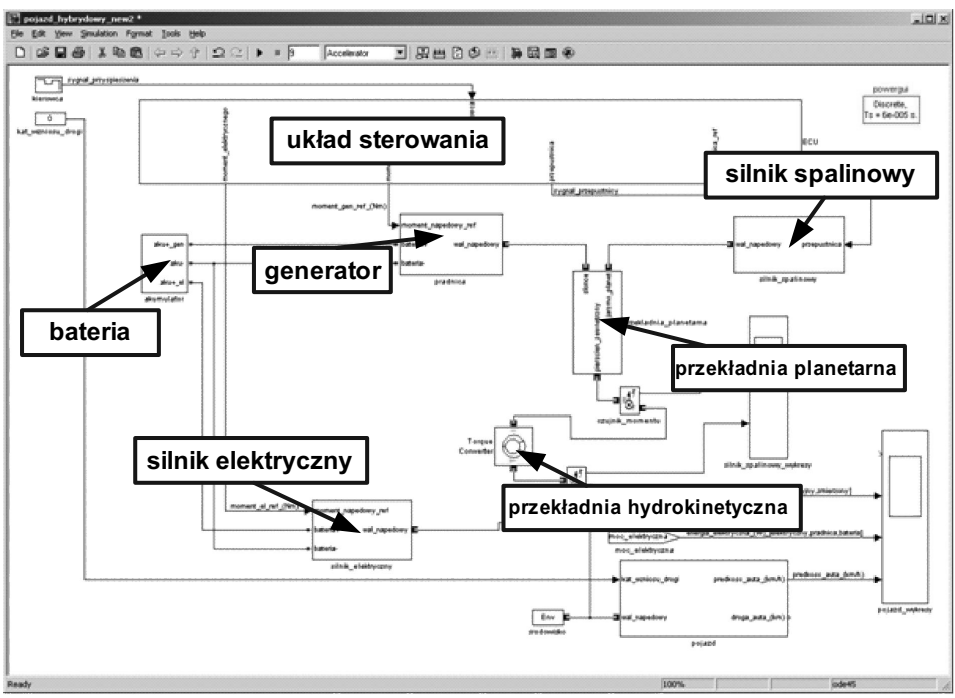
Na rys. 5 przedstawiono przekładnię hydrokinetyczną z dodatkowym elementem blokującym.

Układy takie charakteryzują się tym, że moc z silnika spalinowego przenoszona jest albo tylko przez element hydrokinetyczny, albo tylko równolegle przez element mechaniczny (sprzęgło blokujące). Zastosowanie takiego układu pozwala na zwiększenie ogólnej sprawności układu napędowego w zakresie wyższych przełożeń kinematycznych.



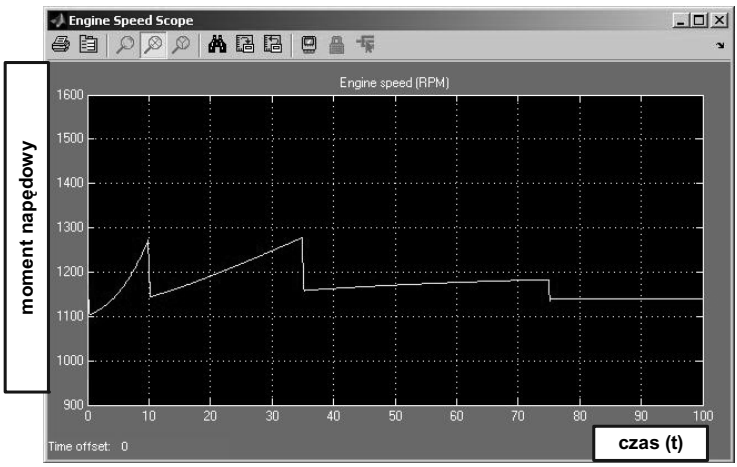
Rys. 14. Przekładnia hydrokinetyczna z blokującym sprzęgłem mechanicznym [1]

Rys. 6 przedstawia model pojazdu hybrydowego zbudowanego w oprogramowaniu MatLAB/Simulink. Przekładnię hydrokinetyczną zainstalowano tylko po stronie silnika spalinowego. Silnik spalinowy to jednostka odpowiadająca parametrom silnika firmy GM/Opel o pojemności 1.0L i mocy maksymalnej 40kW. Koncepcja połączenia mechanicznego jednostek napędowych odpowiada hybrydzie równoległej. Silnik spalinowy w takim przypadku może napędzać pojazd kołowy jak również generator elektryczny.



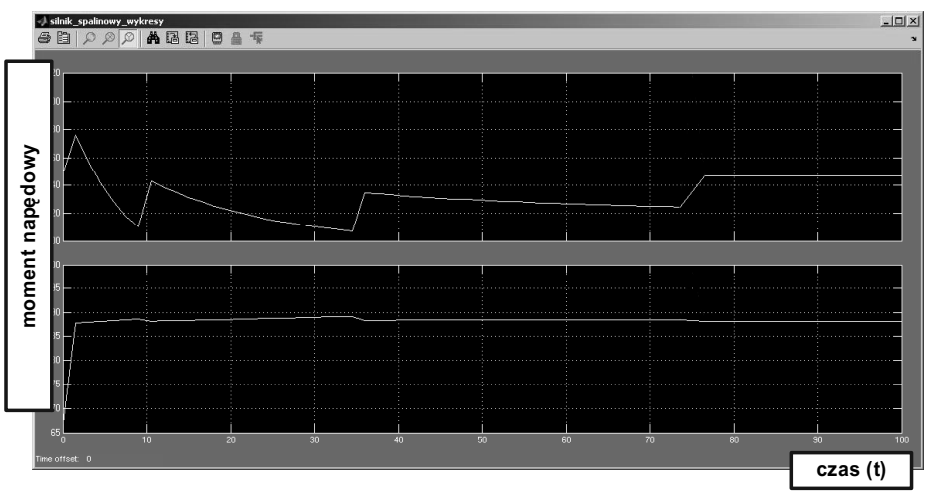
Rys. 15. Model pojazdu hybrydowego wyposażonego w przekładnię hydrokinetyczną po stronie silnika spalinowego

W celu lepszego zobrazowania problemu wynikającego z drgań skrętnych wału i nierównomiernego przenoszenia momentu napędowego bezpośrednio z silnika spalinowego na koła napędowe w modelu zastosowano czterostopniową przekładnię mechaniczną. Rys. 7 przedstawia prędkość obrotową silnika spalinowego dla konkretnych przełożeń wybranych w skrzynce przekładniowej.



Rys. 16. Prędkość obrotowa silnika spalinowego dla odpowiednich biegów

Z kolei na rys. 8 przedstawiono moment napędowy za przekładnią i przed przekładnią hydrokinetyczną. Bardzo dobrze widoczna jest różnica w momencie napędowym przenoszonym bezpośrednio z wału silnika, dla którego podczas zmiany biegów odczuwalne będą szarpnięcia pojazdu i związane z tym nieprzyjemności wynikające z prowadzenia pojazdu kołowego.



Rys. 17. Moment napędowy za przekładnią i przed przekładnią hydrokinetyczną

Przy zastosowaniu przekładni hydrokinetycznej różnica w momencie napędowym występującym na wale silnika przy zmianie biegów jest praktycznie niezauważalna.

4. PODSUMOWANIE

Stosowanie przekładni hydrokinetycznej w znacznym stopniu redukuje wibracje silnika spalinowego, w szczególności przy niskich prędkościach obrotowych oraz w momencie zmiany biegów w skrzynce przekładniowej. Stosując przekładnię hydrokinetyczną zamiast sprzęgła ciernego, zmienia się charakterystykę momentu napędowego, przez co układ napędowy nie jest narażony na chwilowe przeciążenia, a właściwości trakcyjne pojazdu znacznie poprawia komfort jazdy podczas zmiany przełożeń.

LITERATURA

1. Szydelski Z.: Sprzęgła, hamulce i przekładnie hydrokinetyczne. Warszawa: WKiŁ, 1981.
2. Szydelski Z.: Sprzęgła i przekładnie hydrokinetyczne. Warszawa: WNT, 1973.
3. Kost G., Nierychlok A.: Napęd hybrydowy. Koncepcja sterowania. „Przegląd Mechaniczny" 2011, nr 3, s. 30 – 36.
4. Jędrzejowski J.: Mechanika układów korbowych silników samochodowych. Warszawa: WKiŁ, 1986.
5. Wajand J.A., Wajand J.T.: Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybkoobrotowe. Warszawa: WNT 2005.

APPLICATION OF TORQUE CONVERTER TO REDUCE VIBRATION IN HYBRID WHEELED VEHICLE

Summary. The paper describes the concept application of the torque converter to reduce vibrations in a hybrid propulsion system of a wheeled vehicle. Application of this approach allows for the effective elimination of vibration arising during switching the drive units or attaching to the engine a power booster (Synergy Drive). Switched at different speeds allows the elimination a vibration of differences speed of the vehicle.